

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Martin Halama

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského
inženýrství

Realizace generátoru přesného napět'ového
signálu

Realization of Accurate Voltage Signal
Generator

2017

Halama Martin

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Halama**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612R041 Řídicí a informační systémy
Téma: Realizace generátoru přesného napětového signálu
Realization of Accurate Voltage Signal Generator
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Studium možností generace uživatelsky definovaného napětového signálu.
2. Realizace aplikace virtuálního generátoru uživatelem definovaného signálu.
3. Realizace proudového, uživatelem definovaného, měřicího signálu.
4. Ověření generátoru při praktickém měření.
5. Vyhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. 1. vyd. Ilustroval Viktorie VLACHOVÁ. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [2] WITTASSEK, Tomáš. *Virtuální instrumentace I*. Sylaby do předmětu Virtuální instrumentace I. Ostrava 2012. 264 s.
- [3] KOVAL, Ludvík. *Elektrická měření - učební text a návody do cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012. 147 s. Dostupné také z: <http://lms.vsb.cz/course/view.php?id=31362>.
- [4] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. *Keysight Technologies 33500B Series Waveform Generators*. Data sheet. Keysight Technologies, USA, c2012-2015. Dostupné také z: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-0692EN.pdf?id=2202606>.
- [5] AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent 33500 Series 30 MHz Function Arbitrary Waveform Generator*. User's Guide. Loveland, CO, USA: Agilent Technologies, Inc., c2010. Dostupné také z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/33520-90001.pdf>.

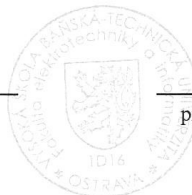
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ludvík Koval, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Jiří Koziolek, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení Studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Datum: 28.4.2017

Podpis: 

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Ludvíku Kovalovi, Ph.D. za odborné konzultace, vstřícný přístup a cenné rady při tvorbě této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá realizací generátoru přesného napěťového signálu, který je vytvořen pomocí virtuálního generátoru v programu LabVIEW, který komunikuje s generátorem Agilent 33521B přes rozhraní USB. Pro dosažení požadované hodnoty napětí a proudu je na výstup generátoru připojen výkonový zesilovač AE TECHRON 7224, který dále tento signál zesiluje.

Cílem bakalářské práce je ověřit generaci napěťového uživatelem definovaného signálu a proudového měřicího signálu pomocí harmonického zkreslení signálu vyššími harmonickými.

Generátor měřicího signálu bude sloužit pro potřeby testování měřicích přístrojů.

Klíčová slova

Uživatelsky definovaný signál; Generátor Agilent 33521B; LabVIEW; výkonový zesilovač AE TECHRON 7224; operační zesilovač

Abstract

The bachelor thesis deals with realization of accurate voltage signal generator, which is created using a virtual generator in LabVIEW, which communicates with the generator Agilent 33521B via the USB interface. To achieve the required voltage and current, the AE TECHRON 7224 power amplifier is connected to the generator output, which further amplifies this signal.

The aim of the bachelor thesis is to verify generation of voltage user-defined signals and current measuring signal by means of harmonic distortion of the signal with higher harmonics.

Measuring signal generator will be used to testing the measuring instruments.

Key Words

User defined signal; generator Agilent 33521B; LabVIEW; power amplifier AE TECHRON 7224; Operational amplifier

Obsah

1	Úvod.....	14
2	Generátory harmonického průběhu.....	15
2.1	Nízkofrekvenční generátory RC.....	15
2.1.1	Oscilátor s Wienovým článkem	15
2.2	Vysokofrekvenční generátory RF	16
3	Generátor funkcí.....	17
3.1	Popis generace signálu	17
3.2	Generátor programovatelného průběhu.....	17
4	Použité přístroje.....	18
4.1	Generátor Agilent 33521B	18
4.1.1	Základní vlastnosti generátoru	18
4.1.2	Typy generovaných signálů.....	19
4.1.3	Rozlišení amplitudy.....	19
4.1.4	Trueform technologie.....	19
4.1.5	Kompatibilita.....	20
4.1.6	Vlastnosti USB rozhraní.....	20
4.2	Multimetr Agilent 34401 A.....	21
4.3	Výkonový zesilovač AE TECHRON 7224	21
4.3.1	Tok signálu zesilovačem	21
4.3.2	Pokročilá nastavení	23
4.4	Mód kontrolovaného napětí	23
4.5	Mód kontrolovaného proudu.....	23
4.5.1	Transkonduktanční zesilovač	24
4.6	Operační zesilovač	24
4.7	Zpětná vazba	25
4.8	Analyzátor kvality elektřiny ENA330.....	25
5	Postup.....	27
6	LabVIEW	28
6.1	Popis programu LabVIEW.....	28
6.2	Princip funkce	28

6.2.1	Virtuální přístroj	28
6.2.2	Čelní panel.....	28
6.2.3	Blokový diagram	29
7	Tvorba virtuálního generátoru.....	30
7.1	Propojení generátoru s PC.....	30
7.2	Použité funkce přístrojového ovladače Agilent 3352X Series	31
7.2.1	Agilent 3352X Series.lvlib:Initialize.vi.....	31
7.2.2	Agilent 3352X Series.lvlib:Creat Arbitrary Waveform.vi	31
7.2.3	Agilent 3352X Series.lvlib:Configure Arbitrary Waveform.vi.....	31
7.2.4	Agilent 3352X Series.lvlib:Enable Chanel Output.vi	32
7.2.5	Agilent 3352X Series.lvlib:Close.vi.....	32
7.2.6	Agilent 3352X Series.lvlib:Clear Arbitrary Memory.vi.....	32
7.3	Ověření komunikace s generátorem Agilent 33521B pomocí LabVIEW	32
8	Realizace napět'ového signálu.....	34
9	Realizace proudového signálu.....	36
10	Realizace virtuálního napět'ového a proudového generátoru v LabVIEW	45
11	Ověření funkčnosti na praktickém měření	47
11.1	Ověření napět'ového uživatelem definovaného signálu	47
11.2	Ověření proudového měřicího signálu	50
12	Závěr	53
	Seznam literatury.....	54
	Seznam příloh.....	56

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratky

AC	Střídavé napětí (proud)	
C	Programovací jazyk	
DC	Stejnoseměrné napětí (proud)	
DDS	Přímá Digitální Syntéza (Direct Digital Synthesis)	
Ethernet	Komunikační rozhraní	
FFT	Rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform)	
GPIO	Komunikační rozhraní (General Purpose Interface Bus)	
HDD	Pevný disk (Hard Drive Device)	
LabVIEW	Grafické programovací prostředí	
LAN	Lokální síť	
NF	Nízkofrekvenční	
NI	National Instruments	
OTA	Operational Transconductance Amplifier	
OZ	Operační zesilovač	
PC	Osobní počítač (Personal Computer)	
RMS	Efektivní hodnota (Root Mean Square)	
SIM	Speciální vstupní modul	
THD	Celkové harmonické zkreslení (Total harmonic distortion)	(%)
USB	Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)	
VI	Virtuální přístroj	
V _{PP}	Napětí špička špička (Volts peak to peak)	

Symboly

A _U	Napěťový přenos	(dB)
f	Frekvence	(Hz)
f ₀	Rezonanční frekvence	(Hz)
I _{OUT}	Výstupní proud OZ	(mA)
I _i	Proud dané harmonické	(mA, %)
U _G	Napětí generátoru Agilent	(V _{PP})

U_{GRMS}	Efektivní hodnota napětí generátoru Agilent	(V)
U_i	Napětí dané harmonické	(V)
U_{VST}	Vstupní napětí OZ	(V)
U_{VYS}	Výstupní napětí výkonového zesilovače	(V)
U_{VYST}	Výstupní napětí OZ	(V)
y	Korekce signálu	(V)

Seznam ilustrací

Obrázek 1 Oscilátor s Wienovým článkem [1]	15
Obrázek 2 Schéma zapojení LC oscilátoru [2].....	16
Obrázek 3 Možné schéma zapojení funkčního generátoru [2]	17
Obrázek 4 Generátor Agilent 33521B [3]	18
Obrázek 5 Rozdíl mezi 14 a 16 bitovým vertikálním rozlišením [4]	19
Obrázek 6 Rozdíl mezi DDS a Trueform technologií [5]	20
Obrázek 7 Multimetr Agilent 34401A [6].....	21
Obrázek 8 Funkční blokové schéma výkonového zesilovače AE TECHRON 7224 [8]	22
Obrázek 9 Výkonový zesilovač AE TECHRON 7224 [10].....	23
Obrázek 10 Schématická značka OTA zesilovače [11]	24
Obrázek 11 Analyzátor sítí ENA330 [12].....	26
Obrázek 12 Ukázka jednoduchého kódu.....	28
Obrázek 13 Okno pro vyhledávání ovladačů	30
Obrázek 14 Initialize.vi	31
Obrázek 15 Creat Arbitrary Waveform.vi.....	31
Obrázek 16 Configure Arbitrary Waveform.vi	31
Obrázek 17 Enable Chanel Output.vi.....	32
Obrázek 18 Close.vi	32
Obrázek 19 Clear Arbitrary Memory.vi.....	32
Obrázek 20 Blokové schéma zapojení měřicího řetězce	32
Obrázek 21 Blokový diagram základní aplikace generátoru.....	33
Obrázek 22 Čelní panel základního generátoru	33
Obrázek 23 Neinvertující zapojení OZ se zpětnou vazbou	36
Obrázek 24 Závislost výstupního proudu na vstupním napětí invertujícího OZ.....	37
Obrázek 25 Frekvenční charakteristika NF operačního zesilovače	38
Obrázek 26 Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače na prázdko	41
Obrázek 27 Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače se zátěží	42
Obrázek 28 Teoretický předpoklad pro generaci proudového signálu.....	43
Obrázek 29 Potřebná korekce pro generaci proudového signálu 1 A	44
Obrázek 30 Čelní panel virtuálního generátoru	45

Obrázek 31 Blokový diagram virtuálního generátoru	46
Obrázek 32 Vymazání volatilní paměti generátoru Agilent.....	46
Obrázek 33 Blokové schéma znázorňující ověření generátoru	47
Obrázek 34 Ukázka měřicího pracoviště pro ověření generátoru	52

Seznam tabulek

Tabulka 1 Výstupní hodnoty napětí, proudu a výkonu výkonového zesilovače [9]	22
Tabulka 2 Technická specifikace napětěvých vstupů [12]	25
Tabulka 3 Technické parametry proudových vstupů [12]	26
Tabulka 4 Technické parametry hardwaru [12]	26
Tabulka 5 Napětěvý signál 20 V	34
Tabulka 6 Napětěvý signál 40 V	34
Tabulka 7 Napětěvý signál 60 V	34
Tabulka 8 Napětěvý signál 80 V	35
Tabulka 9 Napětěvý signál 100 V	35
Tabulka 10 Invertující zapojení operačního zesilovače	36
Tabulka 11 Zesílení OZ TDA2020 při proudu 50 mA	37
Tabulka 12 Zesílení OZ TDA2020 při proudu 100 mA	38
Tabulka 13 Zesílení OZ TDA2020 při proudu 200 mA	38
Tabulka 14 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, při $U_{VST} = 1 V_{PP}$	39
Tabulka 15 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, $U_{VST} = 2 V_{PP}$	39
Tabulka 16 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, $U_{VST} = 3 V_{PP}$	39
Tabulka 17 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, $U_{VST} = 5 V_{PP}$	40
Tabulka 18 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, $U_{VST} = 8 V_{PP}$	40
Tabulka 19 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, $U_{VST} = 10 V_{PP}$	40
Tabulka 20 Frekvenční závislost zatíženého výkonového zesilovače při $I = 500 \text{ mA}$	41
Tabulka 21 Frekvenční závislost zatíženého výkonového zesilovače při $I = 1 \text{ A}$	41
Tabulka 22 Frekvenční závislost zatíženého výkonového zesilovače při $I = 1,495 \text{ A}$	42
Tabulka 23 Frekvenční závislost zatíženého výkonového zesilovače při $I = 2,01 \text{ mA}$	42
Tabulka 24 Proměření proudového rozsahu 1 A, a zavedení korekce y	43
Tabulka 25 Ověření napětěvého uživatelem definovaného signálu 60 V	48
Tabulka 26 Ověření napětěvého uživatelem definovaného signálu 80 V	49
Tabulka 27 Ověření napětěvého uživatelem definovaného signálu 100 V	50
Tabulka 28 Ověření proudové měřicího signálu od 0,2 A do 0,6 A	51
Tabulka 29 Ověření proudového měřicího signálu pro 0,8 a 1 A	52

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá realizací generátoru přesného napěťového signálu, který bude ovládán pomocí virtuálního generátoru vytvořeného v programu LabVIEW. Tento virtuální generátor bude schopen generovat uživatelsky definovaný napěťový signál a proudový, uživatelem definovaný měřicí signál. Oba tyto signály bude možno zkreslit vlivem vyšších harmonických, v tomto případě se jedná o frekvence do 2450 Hz, což odpovídá 49 harmonické. Tudíž k základnímu signálu je možnost přidat signál, který se bude skládat z pěti lichých harmonických s danou úrovní amplitudového zkreslení.

Pro generaci signálu byl použit generátor Agilent 33521B, který komunikuje přes USB rozhraní s PC, pomocí, kterého je možnost ovládat generátor aplikací vytvořenou v LabVIEW. Jelikož generátor Agilent je schopen generovat napěťový signál do hodnoty 10 V_{PP}, je potřeba signál dále zesílit, aby byla možnost generovat napěťový signál hodnoty 100 V AC a proudový signál o hodnotě 1 A AC. Pro tuto možnost byl použit výkonový zesilovač AE TECHRON 7224, který lze nastavit do módu kontrolovaného napětí nebo proudu, což znamená možnost ovládat výstupní signál vstupním napětím.

Bylo zapotřebí proměřit frekvenční charakteristiku tohoto výkonového zesilovače, v zatíženém a nezatíženém stavu. Pro realizaci generace proudového, uživatelem definovaného, měřicího signálu, bylo zapotřebí zavést korekci v podobě lineární regrese, kdy se zvyšující se frekvencí (hodnotou harmonické) je nutno zvýšit vstupní napětí.

Ověření generátoru bylo provedeno pomocí analyzátoru kvality elektřiny ENA 330, který je schopen měřit FFT spektrum napěťového nebo proudového signálu.

2 Generátory harmonického průběhu

Základním blokem generátoru harmonického průběhu je harmonický oscilátor.

Generátory harmonického průběhu lze rozdělit do dvou skupin a to:

- RC nízkofrekvenční generátory
- RF vysokofrekvenční generátory

2.1 Nízkofrekvenční generátory RC

Obvykle pracují v pásmu 10 Hz až 20 MHz, jejich výstupní impedance má hodnotu 50 Ω . Hlavní předností těchto generátorů je tvorba harmonického průběhu s velmi malým zkreslením v rozmezí 0,01 – 0,001 %.

Základním stavebním blokem generátoru je RC oscilátor (například Wienův článek), jehož hodnotu lze korigovat změnou hodnoty kapacity a odporu.

2.1.1 Oscilátor s Wienovým článkem

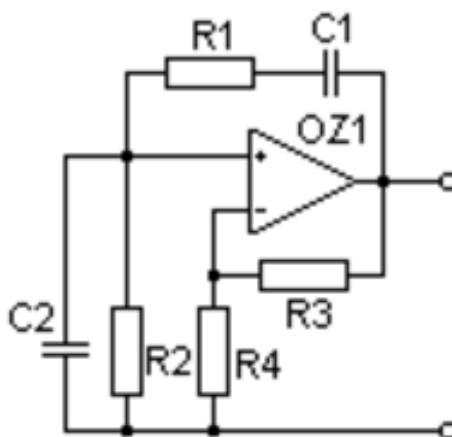
Oscilátor obsahuje dvě zpětné vazby, z nichž je frekvenčně závislá kladná zpětná vazba (R_1 , R_2 , C_1 , C_2), která má při pracovním kmitočtu nejvyšší přenos a nulový fázový posun. Frekvenčně nezávislá záporná zpětná vazba (R_3 , R_4) udává zesílení operačního zesilovače. [1]

Rezonanční frekvence oscilátoru je úměrná převrácené hodnotě součinu R a C (1).

Tento vzorec platí, jestliže je splněna podmínka, že se hodnoty odporů R_1 a $R_2 = R$ a zároveň se rovnají hodnoty kapacit C_1 a $C_2 = C$.

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (1)$$

Na obrázku 1 lze vidět základní zapojení oscilátoru s Wienovým článkem.



Obrázek 1 Oscilátor s Wienovým článkem [1]

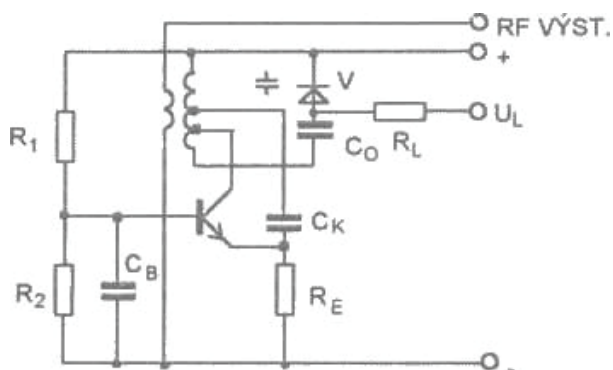
2.2 Vysokofrekvenční generátory RF

Generátory RF využívají zapojení s LC oscilátorem, který je přeladován, změnou kapacity a indukčnosti. Nejčastěji pracují v pásmu od desítek kHz do stovek MHz. Při nízkých frekvencích se nepoužívají, z důvodů příliš velké hodnoty indukčnosti. Frekvenci oscilací nastavujeme změnou kapacity varikapu V (dioda je polována v závěrném směru). Obecně tyto generátory umožňují amplitudovou i frekvenční modulaci generovaného signálu. Zkreslení u těchto generátorů je méně než 1 %.

Rezonanční frekvence tohoto oscilátoru je udána vztahem (2)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Na obrázku 2 je vidět zapojení LC oscilátoru, které lze použít v RF generátorech, kde za pomoci varikapu lze měnit hodnotu frekvence.



Obrázek 2 Schéma zapojení LC oscilátoru [2]

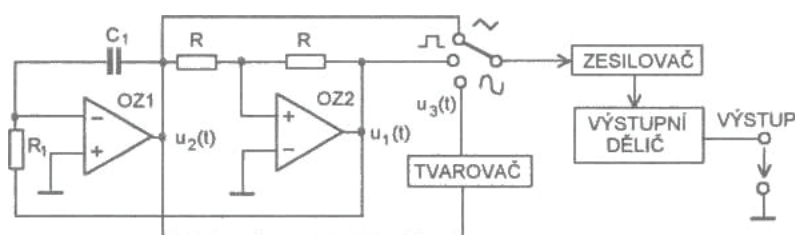
3 Generátor funkcí

Jedná se o zařízení, pomocí kterého lze generovat signál s určitým periodickým průběhem. Generované průběhy mohou být typu sinus, obdélník, pila, impuls a uživatelsky definovaný signál. U těchto signálů můžeme nastavovat frekvenci, amplitudu, offset a fázi. Funkční generátory se používají především při ověření a nastavení různých elektronických obvodů, jako jsou například zesilovače a filtry.

3.1 Popis generace signálu

Mezi základní blok funkčního generátoru se řadí obvod, který generuje trojúhelníkové periodické napětí v posloupnosti pravoúhlých pulsů. Pomocí tvarovače je toto trojúhelníkové napětí převedeno na harmonické napětí. Funkci generátoru lze popsat pomocí jednoduchého zapojení na obrázku 3.

Hlavní prvkem generátoru je operační zesilovač OZ1, který je zapojen jako integrátor a napěťový komparátor s hysterezí jako operační zesilovač OZ2. Pomocí vyvedení napětí $u_1(t)$ a $u_2(t)$, dokážeme získat obdélníkové a trojúhelníkové napětí. Díky tvarovači, který je tvořený nelineárními prvky se sinusovou převodní charakteristikou, získáme harmonické napětí, které odpovídá sinusovému průběhu. [2]



Obrázek 3 Možné schéma zapojení funkčního generátoru [2]

Změnou časové konstanty integrátoru, tudíž změnou hodnot RC , lze docílit nastavení frekvence generátoru v rozsahu jednotek mHz až do desítek MHz, nutno ale dodat, že přesnost nastavení se pohybuje v jednotkách procent z celkového rozsahu. [2]

3.2 Generátor programovatelného průběhu

V zahraniční literatuře se setkáme s pojmem Arbitrary waveform generator, pod tímto názvem si lze představit generátor, který je schopen generovat libovolný periodický signál. Uživatel může nastavit a definovat parametry pro frekvenci, amplitudu i celkový tvar signálu.

4 Použité přístroje

V této kapitole jsou popsány použité přístroje a zařízení, jsou zde uvedeny jejich základní vlastnosti, technické parametry, funkce a možnosti zapojení.

4.1 Generátor Agilent 33521B

Pro generaci uživatelem definovaného napětového signálu byl použit generátor funkcí od firmy Agilent, ze série 33500B, konkrétně se jedná o model 33521B. Tento generátor je schopen poskytnout vysokou přesnost generovaného signálu s minimálním zkreslením, další výhodou je možnost generování vlastního průběhu (Arbitrary waveform).



Obrázek 4 Generátor Agilent 33521B [3]

4.1.1 Základní vlastnosti generátoru

Minimální frekvence generátoru je $1\mu\text{Hz}$ a je schopen generovat signál až do 30 MHz. Výstupní impedance generátoru má hodnotu $50\ \Omega$. Jeho vertikální rozlišení dosahuje hodnoty 16 bitů, což zaručuje pro účely této práce dostatečnou přesnost zobrazení generovaného signálu. Je schopen generovat napětový signál v rozmezí 1 mV_{PP} až 10 V_{PP} .

Generace signálu probíhá kombinací přímé digitální syntézy DDS a generace signálu bod po bodu (point-by-point). Spojením obou těchto metod lze docílit nižších vibrací i nižšího harmonického zkreslení, než je běžné u podobných generátorů v této cenové kategorii. Celkové harmonické zkreslení THD dosahuje hodnoty menší než 0,04 %. Z toho vyplývá, že je generátor schopen pracovat s přesným nezkresleným signálem. Generátor má již v sobě zabudovaný také antialiasingový filtr, takže již dále není potřeba řešit přidání externího filtru.

Jeho mezi další vlastnosti spadá modulace signálu pomocí amplitudové modulace (AM), fázové modulace (PM), frekvenční modulace (FM), pulsně šířkové modulace (PWM), klíčování frekvenčním posuvem (FSK) a binárně – fázové klíčování (BPSK).

Vzorkovací kmitočet generátoru je 250 MSa/s pro vyšší časové rozlišení libovolných průběhů.

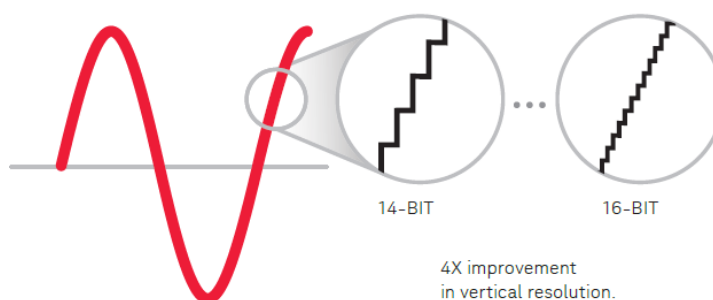
Generátor je osazen TFT displejem o velikosti 4,3 palce pro přehledné zadávání a zobrazování generovaných průběhů uživatelem. [4]

4.1.2 Typy generovaných signálů

- Sinusový signál
- Obdélníkový signál
- Impuls
- Pilovitý signál
- Šumový signál
- Stejnoseměrný signál
- Uživatelsky definované signály – Arb

4.1.3 Rozlišení amplitudy

Nejvyšší možné rozlišení amplitudy je 16 bitů což je 4x přesnější než u většiny 14 bitových generátorů v podobné cenové kategorii. Možnost změny výstupního napětí odpovídá hodnotě 1 μ V.

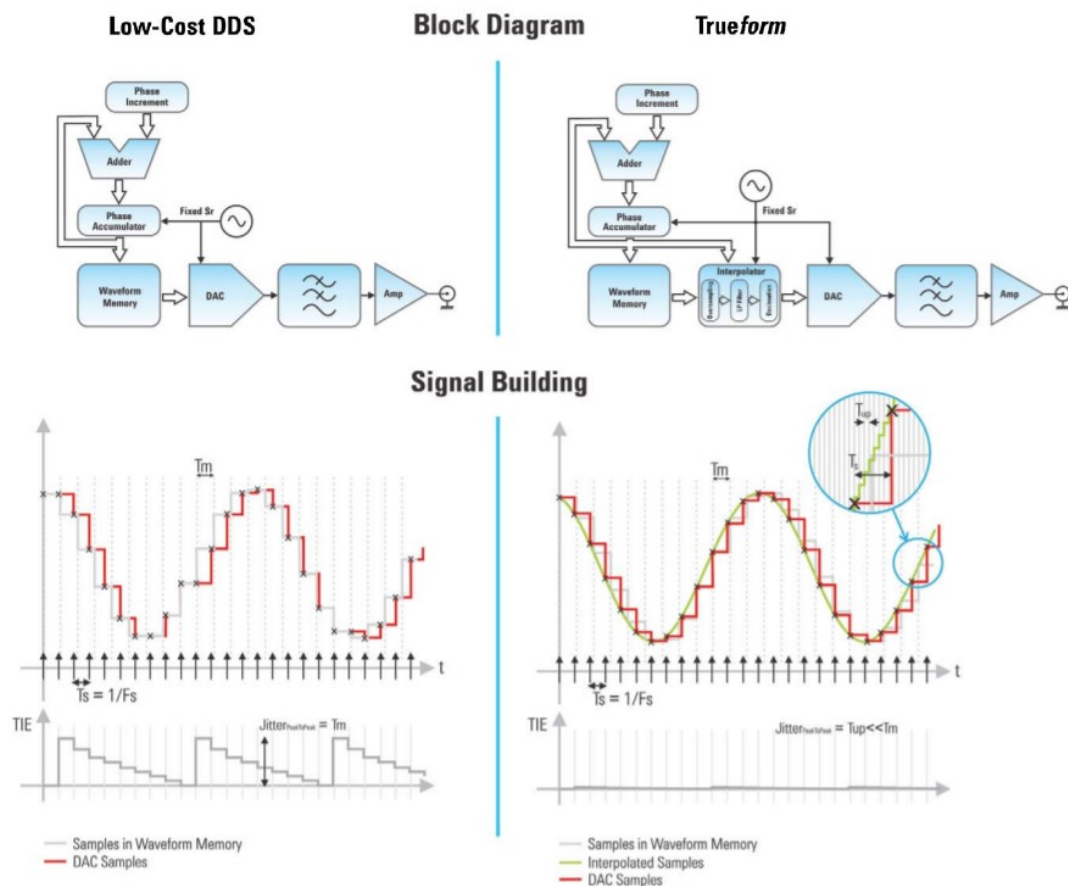


Obrázek 5 Rozdíl mezi 14 a 16 bitovým vertikálním rozlišení [4]

4.1.4 Trueform technologie

Jedná se o metodu generování signálu, která je použita v tomto generátoru. Poskytuje značné výhody oproti generování signálu pomocí přímé digitální syntézy (DDS), která je použita v některých funkčních/programovatelných generátorech. Mezi hlavní výhody se řadí, nižší chvění signálu a věrné zobrazení generovaného průběhu. Pomocí trueform technologie je generátor schopen přesněji generovat signál s menším harmonickým zkreslením, než je tomu u levnější DDS generátorů.

Jak můžeme vidět na obrázku 6, jádra obou struktur se takřka neliší, z toho vyplývá, že trueform technologie pracuje na obdobném principu s tím, že všechny výhody DDS technologie zůstávají a na víc jsou její nevýhody odstraněny. Z diagramu lze vyčíst, že mezi pamětí a digitálně analogovým převodníkem je navíc přidán interpolátor, který zajišťuje přesnější podání signálu, pomocí interpolace chybějících vzorků. Signál se uloží do paměti a je odfiltrován, interpolován, vzorkován. Navíc se celý tento proces děje v reálném čase a nedochází ke ztrátě informace. [5]



Obrázek 6 Rozdíl mezi DDS a Trueform technologií [5]

4.1.5 Kompatibilita

Generátor je schopný komunikovat s připojeným zařízením (notebook, PC) pomocí těchto čtyř rozhraní:

- Ethernet
- GPIB
- LAN
- USB

V tomto případě bylo využito komunikace s generátorem pomocí USB rozhraní. Když je použito 4000 vzorků signálu, které se pošlou do volatilní paměti generátoru, doba jejich nahrání bude odpovídat 8 ms.

4.1.6 Vlastnosti USB rozhraní

Mezi základní parametry rozhraní USB patří jeho přenosová rychlost, která je v rozmezí 1,5 Mbit/s (USB 1.0), 480 Mbit/s (USB 2.0) a 5 Gbit/s (USB 3.0). Velkou výhodou tohoto rozhraní je, že plně odpovídá standardu plug & play, což zaručuje jednodušší rozpoznání a následnou konfiguraci připojeného zařízení. Touto vlastností lze předejít složitému hledání ovladačů pro připojené zařízení i zdlouhavým instalacím doplňků.

4.2 Multimetr Agilent 34401 A

Pro ověření měřených hodnot napětí a proudů při tvorbě této práce byl použit digitální multimetr Agilent 34401 A, který je schopen měřit stejnosměrné (DC) i střídavé (AC) napětí a proud.

Dokáže změřit napětí až o hodnotě 1000 V s přesností na $6^{1/2}$ míst. Měří stejnosměrné napětí s přesností 0,0015 % a střídavé napětí s přesností 0,06 %, což plně dostačuje pro účely této bakalářské práce. [6]



Obrázek 7 Multimetr Agilent 34401A [6]

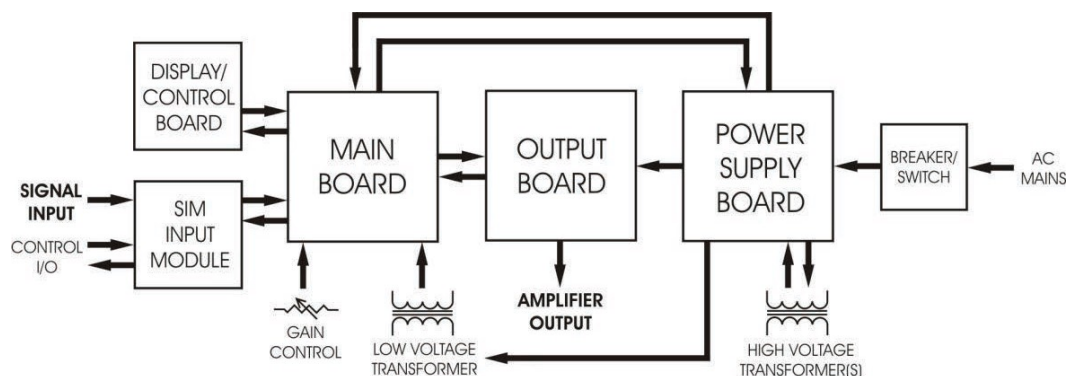
4.3 Výkonový zesilovač AE TECHRON 7224

Jedná se o jeden z nejvíce precizních výkonových zesilovačů určený pro průmyslové aplikace a testování. Tento zesilovač je postaven a testován podle nejprísnejších standardů pro dlouhou životnost a vynikající výkon. Uplatnění nalezne v náročných aplikacích, kde zaručuje nízký šum, malé zkreslení a velké výkonové zesílení v širokém frekvenčním pásmu. Na předním panelu můžeme nastavit hodnotu zesílení pomocí otočného knoflíku, v rozsahu 0–100 % (kde hodnota 100 % odpovídá zesílení 20). [7] [8]

4.3.1 Tok signálu zesilovačem

Vstupní signál, který je přiveden na výkonový zesilovač je směřován ze SIM (Speciální vstupní modul), který je umístěn na zadním panelu, k základní desce. Zde je signál zesílen prostřednictvím nízko šumového operačního zesilovače v zesilovacím stupni, kde probíhá kompenzace sítě, omezení proudu a finální zesílení na výstupní desku. Na výstupní desce je signál poslán do před-ovladačů a následně na koncový stupně, jehož topologie je v AB + B režimu tranzistoru. Ovládání a stav zesilovače je řešen logickým obvodem svázaným s ovládací a zobrazovací deskou na hlavním panelu. Ochrana je zajištěna pomocí obvodů omezujících proud a také speciálním uzlem pro teplotní simulaci, využívající tepelné zpětné vazby chladiče, umístěného na výstupní desce. [8]

Na obrázku 8 lze vidět celkové blokové schéma výkonového zesilovače.



Obrázek 8 Funkční blokové schéma výkonového zesilovače AE TECHRON 7224 [8]

Hlavní parametry:

- Frekvenční pásmo DC až 300kHz při THD menším než 0,1 %.
- Trvalý výkon 1100 wattů RMS (Root Mean Square) při zátěži 4 Ω .
- Schopnost dodávat proud 52 A při zátěži 0,5 Ω po dobu 40 ms pulzu.
- Možností propojit vzájemně více těchto výkonových zesilovačů (až čtyři paralelně zapojené), lze docílit hodnoty výstupního výkonu až 4000 wattů při proudu 200 A.
- Ochrana proti přetížení, nesprávnému připojení výstupu (zkratování, příliš velkému zatížení), přehřátí, nadproudu, příliš nízkému nebo vysokému vstupnímu napětí.
- Nízká hmotnost a malé rozměry vzhledem k výkonu zesilovače. [9]

V tabulce 1 jsou uvedeny výstupní hodnoty napětí a proudu pro výkonový zesilovač v režimu kontrolovaného napětí a kontrolovaného proudu. Doba provozu odpovídá 5 minutám a hodnoty proudu a napětí jsou již v efektivní hodnotě.

Tabulka 1 Výstupní hodnoty napětí, proudu a výkonu výkonového zesilovače [9]

Režim kontrolovaného napětí			
Zátěž (Ω)	Napětí (V)	Proud (A)	Výkon (W)
16	112	6,9	773
8	96	11,5	1104
4	76	18,2	1383
Režim kontrolovaného proudu			
Zátěž (Ω)	Napětí (V)	Proud (A)	Výkon (W)
1	21	21	441
0,75	18	24	432
0,5	16	32	512



Obrázek 9 Výkonový zesilovač AE TECHRON 7224 [10]

4.3.2 Pokročilá nastavení

Zesilovač je navržen pro univerzální použití, z toho vyplývá řada možných konfigurací. Mezi hlavní lze uvést:

- Funguje jako samostatný zesilovač nebo v zapojení s více zesilovači sériově nebo paralelně, kdy poskytne vyšší výkon.
- Nastavení zesílení pomocí otočného knoflíku na čelním panelu, nebo možnost přepnutí na konstantní zesílení o hodnotě 20.
- Možnost fungování zesilovače v režimu kontrolovaného napětí nebo kontrolovaného proudu.
- Konfigurace pro použití vysoko napěťových aplikací, vysoko proudových aplikací, nebo pro aplikace vyžadující střední hodnotu napětí i proudu. [8]

4.4 Mód kontrolovaného napětí

Zesilovač může být nakonfigurován jako napěťový zesilovač (napětí kontrolováno napěťovým zdrojem). Zesilovač poskytne výstupní napětí, které bude konstantní a přímo úměrné řídicímu (vstupnímu) napětí. Pokud se hodnota zátěže bude měnit, zesilovač je schopen na tuto změnu reagovat a usilovat o zachování poměru vstupního a výstupního napětí, zvýšením nebo snížením proudu, který produkuje tak dlouho jak je to v možnostech zesilovače pro vytvoření potřebného proudu. [8]

4.5 Mód kontrolovaného proudu

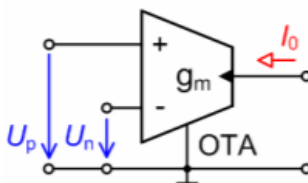
Pro možnost generace proudového signálu, slouží přepnutí výkonového zesilovače do módu proudového zdroje řízeného vstupním napětím. Zesilovač se v tomto zapojení chová jako Transkonduktanční zesilovač, to znamená, že bude poskytovat výstupní proud, který je konstantní a úměrný k řídicímu (vstupnímu) napětí. V případě změny hodnoty zátěže se zesilovač bude snažit udržet tuto transkonduktanci (poměr vstupního napětí k výstupnímu proudu) zvýšením nebo snížením napětí, které produkuje, tak dlouho jak je to v rámci možností zesilovače pro vytvoření potřebného napětí. [8]

4.5.1 Transkonduktanční zesilovač

Ve své podstatě se jedná o zdroj proudu řízený vstupním napětím. Jeho charakteristika se udává přenosovou vodivostí neboli transkonduktancí g_m a jeho činnost je popsána pomocí následujícího vztahu (3).

$$I_0 = g_m(U_p - U_n) \quad (3)$$

Jednotlivá napětí U_p a U_n jsou napětí, která jsou na invertujícím a neinvertujícím vstupu vztažena proti zemi. U ideálních OTA zesilovačů, je transkonduktance g_m kmitočtově nezávislá a konečná. Vstupní i výstupní impedance je teoreticky nekonečná. [11]



Obrázek 10 Schématická značka OTA zesilovače [11]

4.6 Operační zesilovač

Jedná se o základní stavební prvek pro zpracovávání analogových spojitých signálů. Jeho název byl odvozen od možnosti, vytváření matematických operací pomocí různého zapojení OZ. Chování a vlastnosti operačního zesilovače jdou nejlépe popsat na idealizovaném modelu, kdy:

- napěťové zesílení $A = \infty$
- frekvenční rozsah 0 až ∞
- vstupní impedance je nekonečná
- výstupní impedance je nulová
- lineární výstup
- drift a offset je nulový
- nezávislost na teplotě
- nulový šum

Ve skutečnosti se reálný operační zesilovač, těmito hodnotám pouze přibližuje a ve většině případů se liší:

- konečná hodnota zesílení $A \neq \infty$
- zesílení je frekvenčně závislé, se zvyšující se frekvencí se zesílení zmenšuje
- vstupní impedance se pohybuje v řádech desítek $M\Omega$
- výstupní impedance se pohybuje v řádech jednotek Ω
- obvodové součástky jsou závislé na teplotě
- při nulovém vstupním napětí je na výstupu offset
- výstupní napětí není lineárně závislé na vstupním

Napájení OZ je řešeno pomocí symetrického zdroje napětí, ve většině případů se jedná o ± 15 V. Zesilovač má dva vstupy, invertující (-), neinvertující (+) a jeden výstup.

4.7 Zpětná vazba

Zpětná vazba se využívá k zavedení závislosti výstupní hodnoty zpátky na vstup. Většinou rozlišujeme dvě zpětné vazby, a to kladnou nebo zápornou. V této kapitole se budeme zabývat zápornou zpětnou vazbou, jelikož kladná zpětná vazba nenachází příliš využití v důsledku zhoršení vlastností zesilovače (i za cenu toho, že je schopna zvýšit zesílení, zvyšuje i frekvenční nestabilitu, což je značně nežádoucí).

Naopak zavedením záporné zpětné vazby, docílíme stabilizace a přesného nastavení zesílení, zmenšení zkreslení, zlepšení teplotní stability a zvětšení šířky přenosu. Z těchto výhod vyplývá, že se ve většině aplikacích využívá záporné zpětné vazby.

4.8 Analyzátor kvality elektřiny ENA330

Tento model analyzátoru disponuje kompaktními rozměry a je vybaven čtyřmi napěťovými a proudovými vstupy. Proudů lze měřit nepřímo použitím klasických proudových kleští s železným jádrem nebo flexibilních Rogowského cívek – ampFLEX, (jedná se o cívku, která má tvar toroidu, ale neobsahuje feromagnetické jádro). Nutno dodat, že analyzátor nemá displej, tudíž pro zobrazení měřených hodnot je připojen externí monitor. [12]

Analyzátor ENA330 splňuje požadavky normy ČSN EN 61000-4-30 pro přístroje třídy A.

Přístroj se nastavuje pomocí notebooku nebo PC. Pro snadnou komunikaci s ostatními periferními zařízeními je přístroj vybaven komunikačním rozhraním USB a Ethernet. Přístroj lze také vybavit volitelným rozsahem paměti, pro ukládání naměřených dat. Data lze ukládat nepřetržitě až několik měsíců, záleží na zvoleném intervalu ukládání. Dále obsahuje výkonné PC a také záložní zdroj, který je schopen udržet analyzátor v provozu přibližně jednu minutu.

Dále jsou uvedeny alespoň základní parametry napěťových a proudových vstupů a informace týkající se hardwaru. [12] [13]

Tabulka 2 Technická specifikace napěťových vstupů [12]

Napěťové vstupy	
Počet vstupů	4
Vstupní rozsahy	450 V, 250 V, 110 V, 64 V (RMS)
Šířka pásma	45 Hz až 2,5 kHz
Vstupní impedance	200 k Ω , 10 pF
Izolační pevnost	4,2 kV RMS, 50 Hz, 1 min
Přesnost	+/-0,1 %
Zapojení	1-f, 3-f, 3-f+N, hvězda, trojúhelník a Aron

Tabulka 3 Technické parametry proudových vstupů [12]

Proudové vstupy	
Počet vstupů	4
Vstupní rozsahy	Dle použitých proudových kleští
Šířka pásma	45 Hz až 2,5 kHz
Přesnost	+/-0,1 %

Tabulka 4 Technické parametry hardwaru [12]

Hardware	
HDD	16 GB
Rozhraní	USB, Ethernet
A/D převodní	16 bitů
Vzorkovací frekvence	9600 S/s, 19200 S/s, volitelné 38400 S/s
Napájení	180–265 V AC, 47 až 63 Hz
Příkon	20 VA



Obrázek 11 Analyzátor sítě ENA330 [12]

Firmware pro analyzátory BK-ELCOM má již implementován v sobě následující paralelně běžící moduly měřících přístrojů, mezi hlavní patří:

- FFT analyzátor harmonických
- Monitor výkonů a energií
- Osciloskop a Vektorskop
- Monitor napětí
- Monitor efektivní hodnoty napětí [13]

5 Postup

Jelikož je generátor Agilent 33521B schopný generovat napěťový signál do hodnoty 10 V_{PP}, pro dosažení potřebné úrovně napěťového i proudového signálu, je nutno použít výkonový zesilovač AE TECHRON 7224, kterým lze zesílit výstupní napěťový signál z generátoru Agilent 33521B.

Je možnost generovat proudový signál 1 A v rozsahu 20 % což znamená 0,2-0,4-0,6-0,8-1 A při kmitočtech dosahujících hodnoty 2500 Hz. Napěťový signál je možno generovat do hodnoty 100 V, v rozsahu 20, 40, 60, 80 a 100 V

Na tomto zesilovači lze nastavit fixní hodnotu zesílení 20, tudíž je schopen zesilovat vstupní signál konstantně. Nastavení fixního zesílení se provádí na hlavní desce, kterou chrání kovový kryt, který je nutno nejdříve demontovat. Poté je nutno nalézt jumper (mechanická spojka) J10 a odpojit z něj přípojku od otočného knoflíku (ovládání zesílení na čelním panelu) a projít 2 piny vlevo. Tímto je docíleno nastavení fixního zesílení, které je po dobu provozu udržováno na konstantní hodnotě.

Zesilovač může pracovat ve dvou módech, kterými jsou výstupní napětí kontrolováno vstupním napětím, nebo výstupní proud je kontrolován vstupním napětím. Touto konfigurací lze docílit vytvoření napěťového nebo proudového zdroje, který bude odpovídat požadavkům realizace generátoru. Jestliže je zvolena generace napěťového signálu, kdy má být ovládáno výstupní napětí, vstupním napětím, jsou spojeny pravé piny jumperu J4. Pro možnost ovládat výstupní proud, vstupním napěťovým signálem, je nutno spojit levé piny jumperu J4.

Dále lze nastavit zesilovač do módu vysokého napětí nebo proudu. Toto nastavení se opět provádí na hlavní desce, kde je nutno přepojit zástrčky do konektorů J3 a J7 pro mód vysokého výstupního proudu (90 V). Pro mód vysokého výstupního napětí (180 V) je nutno přepojit zástrčky do konektorů J4 a J8.

6 LabVIEW

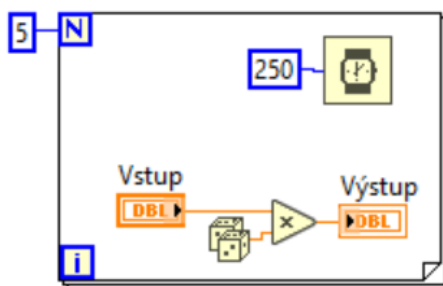
6.1 Popis programu LabVIEW

Jedná se o program, pomocí kterého dokážeme vytvořit softwarovou aplikaci virtuálního měřicího přístroje. LabVIEW vytvořila americká firma National Instruments (NI), která je nadnárodní společností zabývající se vývojem a výrobou hardwarových a softwarových prostředků pro realizaci měřících a řídicích systémů.

Tento program se liší od ostatních programovacích jazyků tím, že místo klasického programování, psaní kódu pomocí textových příkazů, jako je tomu například v jazyku C, využívá k programování ikony. Jedná se o plnohodnotný programovací grafický jazyk, tzv. „G jazyk“ (Graphical language). Jeho obrovskou výhodou je velké všeobecné použití napříč technologiemi a intuitivní ovládání. [14]

6.2 Princip funkce

Celý kód v programu LabVIEW se vykonává na základě principu toku dat (tzv. data flow). To znamená, že uzel v blokovém diagramu se vykoná tehdy, jsou-li na všech jeho vstupech data k dispozici. Pro názornost jsem uvedl jednoduchý příklad násobení dvou čísel, jak můžeme vidět na obrázku 12. Kód se provede pětkrát, tudíž na výstupu se objeví pětkrát rozdílná hodnota, který bude záviset na hodnotě vstupu a aktuální vygenerovaným náhodným číslem, každých 250 ms.



Obrázek 12 Ukázka jednoduchého kódu

6.2.1 Virtuální přístroj

Virtuální přístroj neboli instrument, zkráceně VI, je výsledkem programování v LabVIEW. Svým vzhledem i funkcí může připomínat reálný přístroj (osciloskop, multimetr, generátor, zdroj). Samotné VI se skládá z čelního panelu (Front panel) a blokového diagramu (Block diagram).

6.2.2 Čelní panel

Plní komunikační funkci mezi uživatelem a přístrojem. Na čelním panelu můžeme přidávat ovládací prvky (controls), jako jsou například tlačítka, otočné knoflíky, přepínače a jiné. Dále na čelní panel lze přidat indikační prvky (indicators), jakými jsou grafy, LED, a jiné zobrazovací prvky. Čelní panel reprezentuje vzhled virtuálního přístroje a jeho ovládání. Z pohledu programování se jedná o GUI (Grafické Uživatelské Rozhraní). Uživatel ovládá tento čelní panel pomocí klávesnice a myši.

6.2.3 Blokový diagram

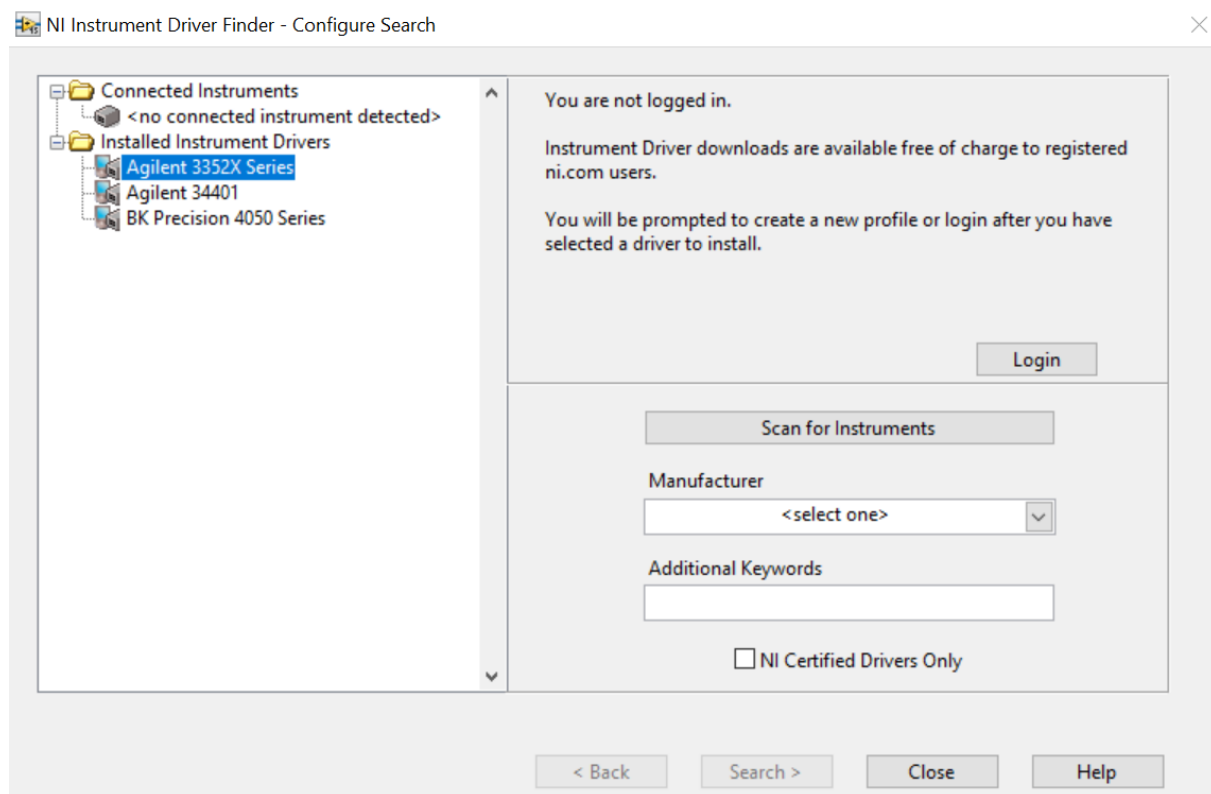
V blokovém diagramu se vytváří a probíhá celý kód. Tento zdrojový kód udává, jak se bude chovat VI po jeho spuštění. Objekty z čelního panelu jsou reprezentovány v blokovém diagramu jako ikony (terminály). Pomocí vodičů jsou propojeny tyto terminály mezi sebou a vytvářejí kód.
[15]

7 Tvorba virtuálního generátoru

Pomocí programu LabVIEW, lze vytvořit virtuální přístroj, v tomto případě generátor, který bude schopen komunikovat a generovat uživatelsky definovaný napěťový signál na generátoru Agilent 33521B. Tento základní signál je ověřen pomocí Osciloskopu Agilent MSO6012A.

7.1 Propojení generátoru s PC

Aby bylo možno generovat uživatelsky definovaný signál na generátoru Agilent 33521B pomocí programu LabVIEW, je nejdříve nutno stáhnout ovladač (driver) Agilent 3352X Series, který podporuje komunikaci a obsahuje ovladače pro nastavení a vytvoření uživatelsky definovaného signálu. Stáhnutí ovladače se dá docílit jednoduchou cestou kdy se v LabVIEW zvolí záložka Tools→Instrumentation→Find Instruments Drivers. Objeví se okno, ve kterém lze vidět připojené zařízení a již nainstalované ovladače, dále můžeme provést hledání daného ovladače pro připojený přístroj přes stránky NI.



Obrázek 13 Okno pro vyhledávání ovladačů

7.2 Použité funkce přístrojového ovladače Agilent 3352X Series

7.2.1 Agilent 3352X Series.lvlib:Initialize.vi

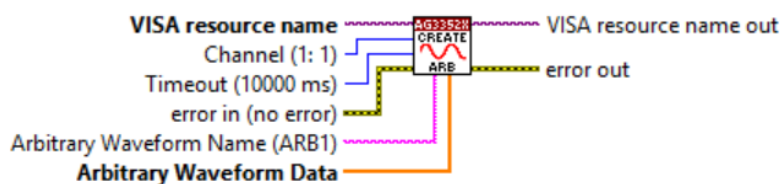
Toto VI zajišťuje komunikaci mezi generátorem Agilent 33521B a LabVIEW. Pomocí VISA resource name nastavujeme cestu ke generátoru – zvolíme USB. Důležitým aspektem je, aby toto VI bylo spuštěno jako první a voláno pouze jednou, před ostatními VI.



Obrázek 14 Initialize.vi

7.2.2 Agilent 3352X Series.lvlib:Creat Arbitrary Waveform.vi

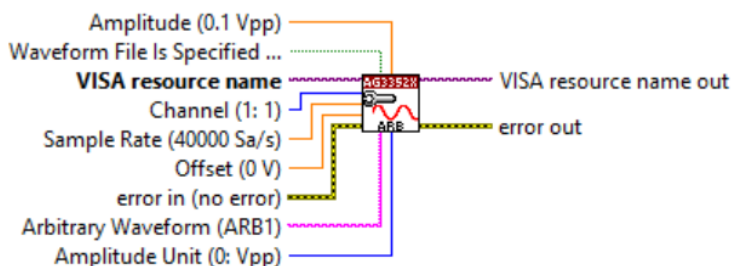
Toto VI vytvoří a uloží vytvořený průběh, který je uživatelsky definovaný, do volatilní (energeticky závislé) paměti.



Obrázek 15 Creat Arbitrary Waveform.vi

7.2.3 Agilent 3352X Series.lvlib:Configure Arbitrary Waveform.vi

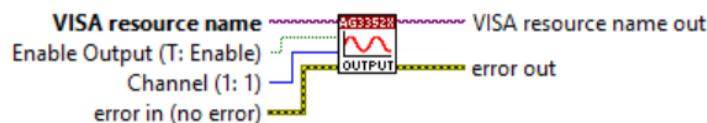
Toto VI vybere uživatelsky vytvořený průběh ve volatilní paměti, nastaví parametry průběhu a vytvoří aktivní průběh funkce. Dá se zde nastavit Amplituda signálu, vzorkovací frekvence, offset a název průběhu.



Obrázek 16 Configure Arbitrary Waveform.vi

7.2.4 Agilent 3352X Series.lvlib:Enable Chanel Output.vi

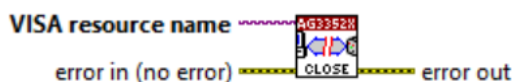
Aktivuje nebo deaktivuje výstupní konektor.



Obrázek 17 Enable Chanel Output.vi

7.2.5 Agilent 3352X Series.lvlib:Close.vi

Toto VI ukončí I/O komunikaci s generátorem Agilent 33521B.



Obrázek 18 Close.vi

7.2.6 Agilent 3352X Series.lvlib:Clear Arbitrary Memory.vi

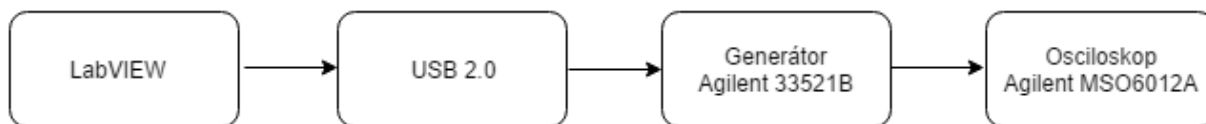
Toto VI se postará o vymazání všech průběhů, které jsou uloženy ve volatilní paměti na daném kanálu.



Obrázek 19 Clear Arbitrary Memory.vi

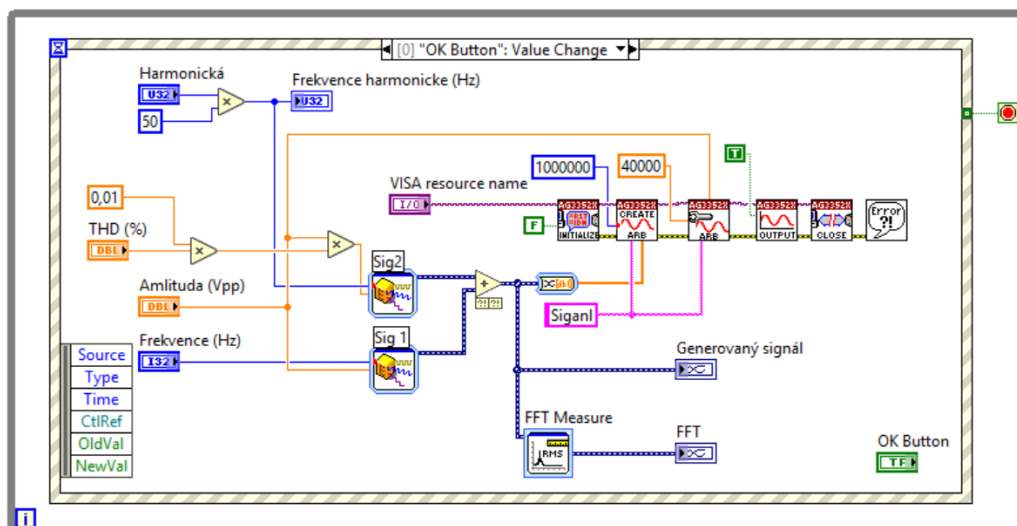
7.3 Ověření komunikace s generátorem Agilent 33521B pomocí LabVIEW

Způsob ověření funkčnosti virtuálního generátoru uživatelsky definovaného napětového signálu, je vidět na obrázku 20, kdy v programu LabVIEW uživatelsky nastavíme napětový signál, který bude uživatelem generován a pomocí USB rozhraní poslán do generátoru Agilent 33521B. Na výstup je následně připojen digitální osciloskop Agilent MSO6012A, kde, již je ověřen generovaný napětový signál, zda se shoduje s nastavenými parametry frekvence a amplitudy signálu.



Obrázek 20 Blokové schéma zapojení měřícího řetězce

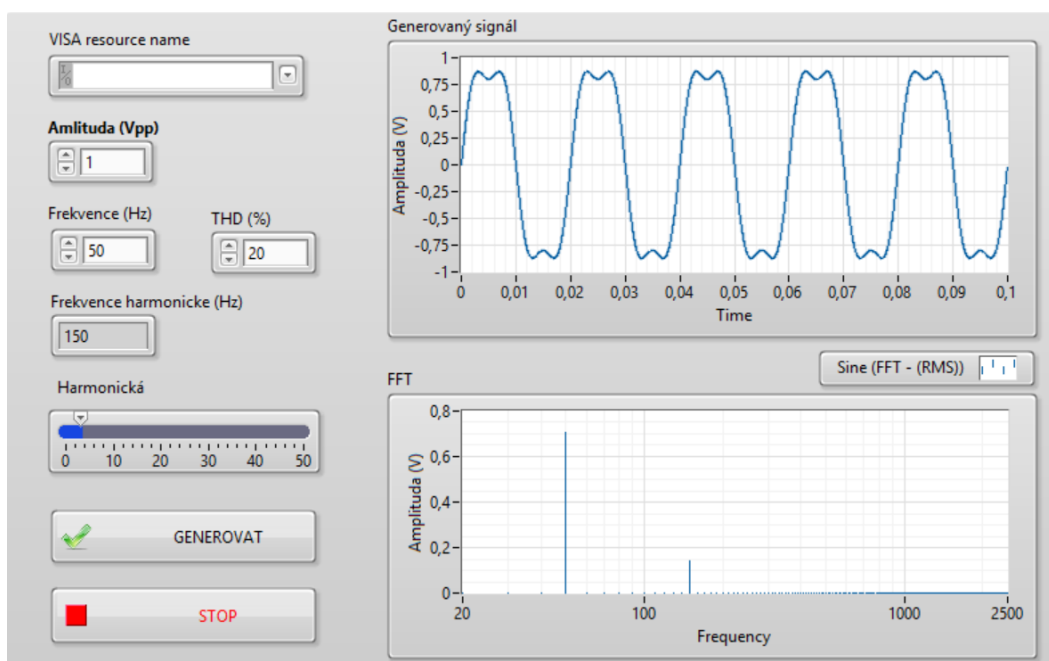
Na obrázku 21, lze vidět blokový diagram v programu Labview, základního generátoru, pomocí kterého je možnost ovládat generátor Agilent 33521B a uživatelsky definovat výstupní signál. Aplikace disponuje možností harmonického zkreslení signálu přidáním až padesáté harmonické, která odpovídá frekvenci o hodnotě 2500 Hz.



Obrázek 21 Blokový diagram základní aplikace generátoru

Na obrázku 22 je zobrazen uživatelný čelní panel v programu Labview, pomocí kterého lze ovládat a nastavovat parametry pro generaci uživatelsky definovaného napěťového signálu. Je zde možnost zadat amplitudu signálu v rozmezí 0,1 – 10 V_{PP}, frekvenci signálu, amplitudové zkreslení harmonického signálu a hodnotu požadované harmonické. Pro indikaci zde slouží dvojice grafů, z nichž jeden zobrazuje celkový signál, který je poslán do generátoru Agilent a druhý graf zobrazuje amplitudové FFT spektrum daného signálu.

V tomto případě je možno vidět signál který obsahuje základní první harmonickou o frekvenci 50 Hz s amplitudou 5 V_{PP} a k tomuto signálu je přimíchána 3 harmonická, která má hodnotu frekvence 150 Hz a její amplitudové zkreslení je nastaveno na 20 %.



Obrázek 22 Čelní panel základního generátoru

8 Realizace napětového signálu

K možnosti generace napětového signálu v rozsahu 0–100 V AC je nutno použít pro zesílení výstupního signálu z generátoru Agilent 33521B, výkonový zesilovač AE TECHRON 7224 v režimu vysokého napětového signálu a současně nastavení módu kontrolovaného napětí, kdy výstupní napětí bude ovládáno vstupním napětím. Každý napětový rozsah byl proměřen v celém použitelném frekvenčním spektru, což v tomto případě znamená v rozmezí 50 – 2,5 kHz. Toto měření bylo provedeno k ověření konstantního zesílení výkonového zesilovače a jeho frekvenční nezávislosti.

Tabulka 5 Napětový signál 20 V

f (Hz)	$U_G (V_{PP})$	$U_{GRMS} (V)$	$U_{VYS} (V)$
50	1,417	1,0025	20,038
100	1,417	1,00131	20,015
500	1,417	1,00126	20,015
1000	1,417	1,0055	20,003
2500	1,417	1,0043	20,001

Tabulka 6 Napětový signál 40 V

f (Hz)	$U_G (V_{PP})$	$U_{GRMS} (V)$	$U_{VYS} (V)$
50	2,84	2,0003	40,007
100	2,84	2,0026	40,046
500	2,84	2,0023	40,043
1000	2,84	2,001	40,02
2500	2,84	1,9989	39,991

Tabulka 7 Napětový signál 60 V

f (Hz)	$U_G (V_{PP})$	$U_{GRMS} (V)$	$U_{VYS} (V)$
50	4,256	3,001	60,031
100	4,256	3,0033	60,072
500	4,256	3,003	60,067
1000	4,256	3,0007	60,027
2500	4,256	2,993	59,994

Tabulka 8 Napětový signál 80 V

f (Hz)	$U_G (V_{PP})$	$U_{GRMS} (V)$	$U_{VYS} (V)$
50	5,678	4,0042	80,08
100	5,678	4,0028	80,073
500	5,678	4,0026	80,067
1000	5,678	3,9998	80,016
2500	5,678	3,9984	80,008

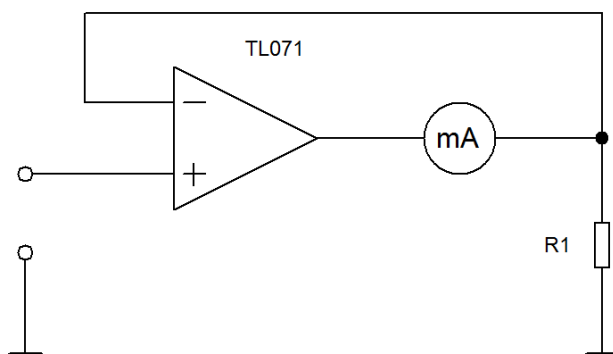
Tabulka 9 Napětový signál 100 V

f (Hz)	$U_G (V_{PP})$	$U_{GRMS} (V)$	$U_{VYS} (V)$
50	7,093	5	100,032
100	7,093	5,003	100,088
500	7,093	5,0027	100,078
1000	7,093	4,9989	100,017
2500	7,093	4,995	100,01

Jak lze vidět z tabulek naměřených hodnot (tabulka 5-9), napětový signál je takřka konstantní v celém používaném frekvenčním pásmu, tudíž není potřeba zavádět korekci napětového signálu.

9 Realizace proudového signálu

Cílem je generovat uživatelsky definovaný, měřicí proudový signál v rozmezí 0-1 A. První postup spočívá v ověření teoretických předpokladů na nízké úrovni proudového signálu. Což v tomto případě znamená, možnost generace proudového signálu ovládaného vstupním napětím. Pro prvotní měření byl použit operační zesilovač TL071, který byl zapojen v invertujícím i neinvertujícím zapojení, kdy byl na zátěži R_Z měřen proud. Při tomto měření byla ověřena možnost generace nízké úrovně proudového signálu v rozmezí 0-20 mA.



Obrázek 23 Neinvertující zapojení OZ se zpětnou vazbou

V tabulce 10 jsou zobrazeny naměřené hodnoty operačního zesilovače v invertujícím zapojení, kdy pomocí hodnoty odporu R a vstupního napětí, byla možnost ovlivnit proud I . Lze si povšimnout, že při hodnotě odporu $R = 100 \, \Omega$ a vstupním napětí 4 V, by došlo k saturaci operačního zesilovače, což je pro toto měření nežádoucí, a tudíž se hodnota vstupního napětí déle nezvyšovala.

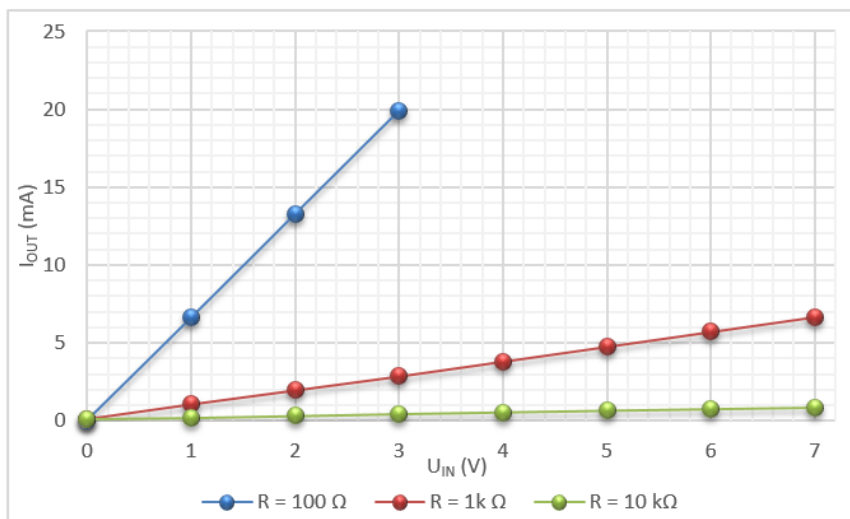
Tabulka 10 Invertující zapojení operačního zesilovače

Zátěž	$R = 100 \, \Omega$	$R = 1k \, \Omega$	$R = 10k \, \Omega$
$U_{IN} \, (V)$	$I_{OUT} \, (mA)$	$I_{OUT} \, (mA)$	$I_{OUT} \, (mA)$
0	0,0586	0,1291	0,1284
1	6,6235	1,0705	0,1953
2	13,263	1,9652	0,3087
3	19,881	2,8603	0,4296
4	-	3,8086	0,5391
5	-	4,7623	0,6385
6	-	5,7167	0,7346
7	-	6,6681	0,8261

Vycházelo se ze vztahu, kdy proud tekoucí do zátěže odpovídal hodnotě podle vztahu (4)

$$I = \frac{u_{IN}}{R_1} \quad (4)$$

Na obrázku 24 je uvedena závislost proudu tekoucího přes odpor R v závislosti na velikosti vstupního napětí.



Obrázek 24 Závislost výstupního proudu na vstupním napětí invertujícího OZ

Poté se přešlo k měření laboratorního přípravku, kde byl zapojen nízkofrekvenční OZ 2xTDA2020. Zde bylo úkolem proměřit kmitočtovou charakteristiku tohoto OZ v rozmezí 50 - 5k Hz, pro různé hodnoty proudu, které v tomto případě byly 50 mA, 100 mA a 200 mA. Prvotní záměr, byl generovat nízkou úroveň proudu, která byla závislá na vstupním napětí z generátoru.

Tabulka 11 Zesílení OZ TDA2020 při proudu 50 mA

f[Hz]	U _{vst} [V]	U _{vyst} [V]	Au [dB]
50	1,10642	1,2942	1,361628
100	1,10718	1,3033	1,416523
200	1,10839	1,3096	1,448921
500	1,10897	1,3151	1,48078
1000	1,10803	1,3201	1,521106
2000	1,10803	1,333	1,605573
5000	1,10816	1,3835	1,927534

Tabulka 12 Zesílení OZ TDA2020 při proudu 100 mA

f (Hz)	U _{VST} (V)	U _{VYST} (V)	A _U (dB)
50	2,2053	2,5775	1,35462
100	2,2035	2,5931	1,414124
200	2,2045	2,6035	1,44495
500	2,2039	2,6136	1,480945
1000	2,2038	2,6251	1,519473
2000	2,2024	2,6508	1,609615
5000	2,2025	2,7519	1,934335

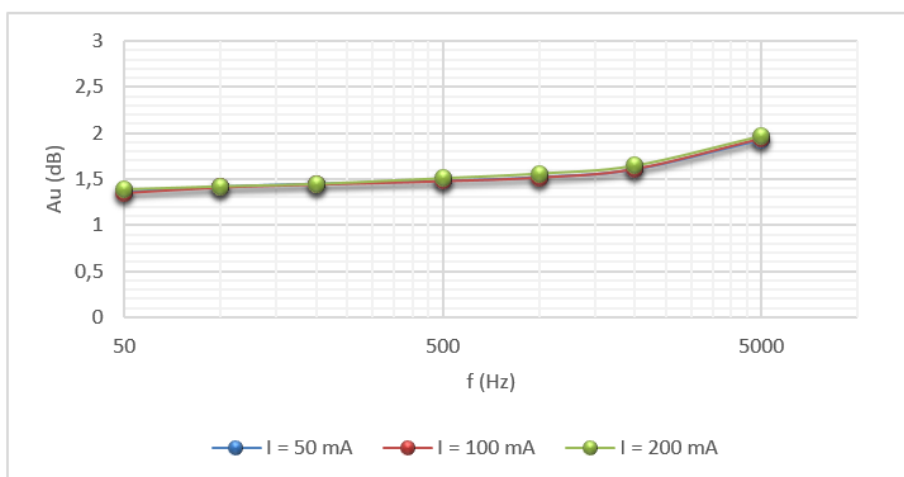
Tabulka 13 Zesílení OZ TDA2020 při proudu 200 mA

f (Hz)	U _{VST} (V)	U _{VYST} (V)	A _U (dB)
50	4,4349	5,2029	1,387233
100	4,445	5,2336	1,418575
200	4,4458	5,2513	1,446338
500	4,4408	5,2827	1,507895
1000	4,4389	5,3112	1,558346
2000	4,4382	5,3635	1,644828
5000	4,4383	5,5672	1,968403

Pro výpočet napěťového zesílení A_U byl použit vztah (5)

$$A_U = 20 * \log \frac{U_{VYST}}{U_{VST}} \quad (5)$$

Na obrázku 25 lze vidět závislost napěťového zesílení operačního zesilovače TDA2020, na frekvenci, z obrázku je zřejmé, že se zvyšující se frekvencí se zvyšovalo zesílení.



Obrázek 25 Frekvenční charakteristika NF operačního zesilovače

Jakmile byla ověřena kmitočtová charakteristika toho NF zesilovače, přešlo se k testování vlastností a chování výkonového zesilovače AE TECHRON 7224.

Nejdříve bylo potřeba proměřit frekvenční charakteristiku, ze které můžeme zjistit, zda je výkonový zesilovač frekvenčně nezávislý. Toto měření bylo provedeno pro frekvenci od 50 Hz do 5k Hz, při různých hodnotách vstupního napětí. Na otočném knoflíku pro volbu zesílení, byla nastavena hodnota zesílení přibližně na 20 %.

Tabulka 14 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, při $U_{VST} = 1 V_{PP}$

f (Hz)	U_{VST} (V)	U_{VYS} (V)	A_U (dB)
50	0,70483	1,3368	5,559641
100	0,70494	1,3369	5,558935
200	0,70501	1,337	5,558723
500	0,70503	1,3371	5,559126
1000	0,70488	1,3368	5,559025
2000	0,70445	1,3358	5,557825
5000	0,70245	1,3313	5,55321

Tabulka 15 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, $U_{VST} = 2 V_{PP}$

f (Hz)	U_{VST} (V)	U_{VYS} (V)	A_U (dB)
50	1,4096	2,6736	5,560011
100	1,4099	2,6741	5,559787
200	1,4101	2,6744	5,559529
500	1,41	2,6745	5,56047
1000	1,4097	2,6739	5,560369
2000	1,4087	2,6719	5,560034
5000	1,4045	2,6637	5,559271

Tabulka 16 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, $U_{VST} = 3 V_{PP}$

f (Hz)	U_{VST} (V)	U_{VYS} (V)	A_U (dB)
50	2,1138	4,0125	5,567023
100	2,1141	4,0131	5,567089
200	2,1142	4,0135	5,567544
500	2,1141	4,0133	5,567522
1000	2,1135	4,0124	5,568039
2000	2,1122	4,0095	5,567104
5000	2,1059	3,9955	5,562668

Tabulka 17 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, $U_{VST} = 5 V_{PP}$

f (Hz)	U_{VST} (V)	U_{VYS} (V)	A_U (dB)
50	3,5242	6,6861	5,562246
100	3,5247	6,6875	5,562833
200	3,5253	6,6881	5,562134
500	3,5249	6,6879	5,562859
1000	3,5242	6,6871	5,563545
2000	3,5217	6,6819	5,562952
5000	3,5105	6,6575	5,558844

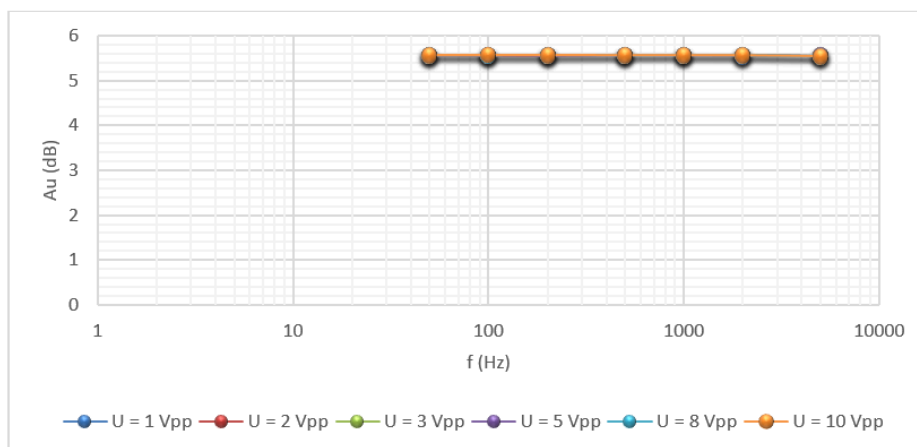
Tabulka 18 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, $U_{VST} = 8 V_{PP}$

f (Hz)	U_{VST} (V)	U_{VYS} (V)	A_U (dB)
50	5,6421	10,7053	5,563161
100	5,6433	10,7079	5,563423
200	5,6436	10,7081	5,563124
500	5,6433	10,7079	5,563423
1000	5,6415	10,7045	5,563436
2000	5,6374	10,6962	5,563013
5000	5,6187	10,6549	5,558271

Tabulka 19 Frekvenční závislost výkonového zesilovače bez zatížení, $U_{VST} = 10 V_{PP}$

f (Hz)	U_{VST} (V)	U_{VYS} (V)	A_U (dB)
50	7,0517	13,376	5,560649
100	7,0532	13,379	5,560749
200	7,0538	13,38	5,560659
500	7,0536	13,379	5,560257
1000	7,0518	13,375	5,559876
2000	7,0461	13,364	5,559753
5000	7,0216	13,31	5,554839

Jak lze vidět v tabulkách 14-19 a na obrázku 26, výkonový zesilovač AE TECHRON zapojen bez zatížení, tudíž na prázdko, je v celém měřeném frekvenčním rozsahu nezávislý a jeho zesílení je na konstantní hodnotě 5,55 dB.



Obrázek 26 Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače na prázdko

Po ověření kmitočtové nezávislosti výkonového zesilovače, zapojeného na prázdko, se plynule přešlo k zatížení výstupu výkonového zesilovače impedancí (tlumivka + odpor). Toto zapojení bylo opět proměřeno pro frekvenční rozsah 50 – 5k Hz, přitom byl měřen proud tekoucí zátěží, který byl regulován vstupním napětím. Proud na zátěži byl v rozsahu 500 mA – 2 A. Opět byla ověřena frekvenční nezávislost a schopnost výkonového zesilovače konstantně zesilovat vstupní signál.

Tabulka 20 Frekvenční závislost zatíženého výkonového zesilovače při $I = 500$ mA

f (Hz)	U_{VST} (V)	U_{VYST} (V)	A_U (dB)
50	1,0432	1,9632	5,491939
100	1,2434	2,3431	5,503599
200	1,3324	2,5111	5,504588
500	1,3707	2,5831	5,503976
1000	1,3848	2,6094	5,503072
2000	1,4058	2,6483	5,500873
5000	1,4744	2,7739	5,48951

Tabulka 21 Frekvenční závislost zatíženého výkonového zesilovače při $I = 1$ A

f (Hz)	U_{VST} (V)	U_{VYST} (V)	A_U (dB)
50	2,0892	3,9334	5,495762
100	2,4924	4,6968	5,503686
200	2,6717	5,0361	5,506133
500	2,7462	5,1769	5,506752
1000	2,7765	5,2335	5,505891
2000	2,8197	5,3142	5,5047
5000	2,9604	5,5719	5,493058

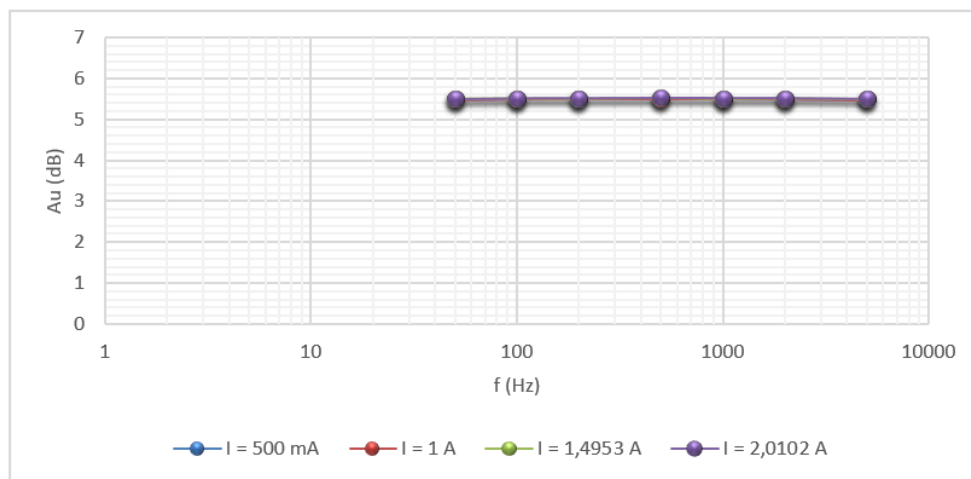
Tabulka 22 Frekvenční závislost zatíženého výkonového zesilovače při $I = 1,495 \text{ A}$

$f \text{ (Hz)}$	$U_{\text{VST}} \text{ (V)}$	$U_{\text{VYST}} \text{ (V)}$	$A_U \text{ (dB)}$
50	3,1275	5,8877	5,494967
100	3,729	7,0275	5,504169
200	4,004	7,5424	5,50031
500	4,1527	7,8368	5,516164
1000	4,2216	7,9473	5,494851
2000	4,2778	8,0627	5,5052
5000	4,4076	8,2896	5,486628

Tabulka 23 Frekvenční závislost zatíženého výkonového zesilovače při $I = 2,01 \text{ mA}$

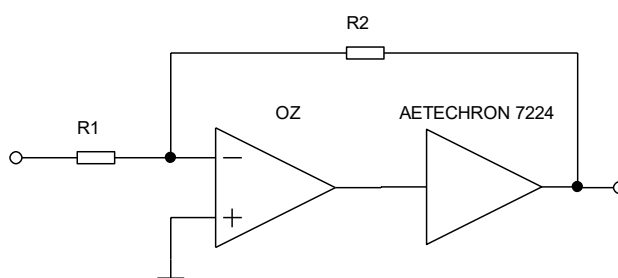
$f \text{ (Hz)}$	$U_{\text{VST}} \text{ (V)}$	$U_{\text{VYST}} \text{ (V)}$	$A_U \text{ (dB)}$
50	4,2301	7,9599	5,49114
100	5,0797	9,5708	5,502204
200	5,4334	10,2404	5,504905
500	5,6461	10,6456	5,508432
1000	5,6746	10,698	5,507347
2000	5,7581	10,8532	5,505572
5000	6,0608	11,4081	5,493667

Opět lze vidět z tabulek 20-23 a obrázku 27, že výkonový zesilovač je frekvenčně nezávislý a zesílení vstupního signálu odpovídá hodnotě 5,5 dB v celém frekvenčním rozsahu až na drobné odchylky v řádech setin.



Obrázek 27 Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače se zátěží

Při snaze generace proudového signálu, pomocí vstupního napětí z generátoru, v rozsahu 0–1 A, bylo vycházeno z teoretického předpokladu, zavedení zpětné vazby z výkonového zesilovače AE TECHRON 7224 zpět na operační předzesilovač, který bude zapojen v invertujícím zapojení, jak můžeme vidět na obrázku 28. Jelikož výkonový zesilovač již v sobě má zabudovanou možnost přepnutí do funkce zdroje proudu kontrolovaného vstupním napětím (transkonduktanční zesilovač), stačí pouze nastavit tento mód. Výkonový zesilovač byl také nastaven do módu konstantního zesílení, která odpovídá hodnotě 20.

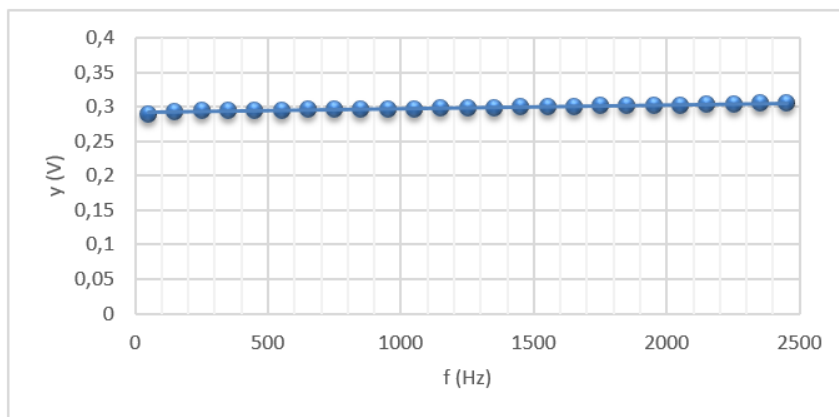


Obrázek 28 Teoretický předpoklad pro generaci proudového signálu

Tabulka 24 Proměření proudového rozsahu 1 A, a zavedení korekce y

HARM.	f (Hz)	I_{OUT} (A)	U_G (V _{PP})	y (V)
1	50	1	0,2895	0,29225
3	150	1	0,2939	0,29275
5	250	1	0,2947	0,29325
7	350	1	0,295	0,29375
9	450	1	0,2953	0,29425
11	550	1	0,2957	0,29475
13	650	1	0,2958	0,29525
15	750	1	0,2961	0,29575
17	850	1	0,2965	0,29625
19	950	1	0,2968	0,29675
21	1050	1	0,2973	0,29725
23	1150	1	0,2982	0,29775
25	1250	1	0,2986	0,29825
27	1350	1	0,2991	0,29875
29	1450	1	0,2995	0,29925
31	1550	1	0,3001	0,29975
33	1650	1	0,3002	0,30025
35	1750	1	0,3012	0,30075
37	1850	1	0,3016	0,30125
39	1950	1	0,3023	0,30175
41	2050	1	0,3029	0,30225
43	2150	1	0,3037	0,30275
45	2250	1	0,3046	0,30325
47	2350	1	0,3057	0,30375
49	2450	1	0,3064	0,30425

Výstupní proud, byl měřen v 1 A rozsahu, po 20 %. Každý proud byl proměřen pro celý rozsah lichých harmonických až do 49. Pomocí lineární regrese byla zavedena korekce se kterou se dále pracuje v LabVIEW, aby bylo docíleno přesnější hodnoty požadovaného proudu na výstupu výkonového zesilovače.



Obrázek 29 Potřebná korekce pro generaci proudového signálu 1 A

Výsledná rovnice (6) pro korekci proudového signálu 1 A má tvar.

$$y = (5E - 6) * f + 0,292 \quad (6)$$

Výsledná rovnice (7) pro korekci proudového signálu 0,8 A má tvar.

$$y = (4E - 6) * f + 0,2351 \quad (7)$$

Výsledná rovnice (8) pro korekci proudového signálu 0,6 A má tvar.

$$y = (3E - 6) * f + 0,1754 \quad (8)$$

Výsledná rovnice (9) pro korekci proudového signálu 0,4 A má tvar.

$$y = (2E - 6) * f + 0,1173 \quad (9)$$

Výsledná rovnice (10) pro korekci proudového signálu 0,2 A má tvar.

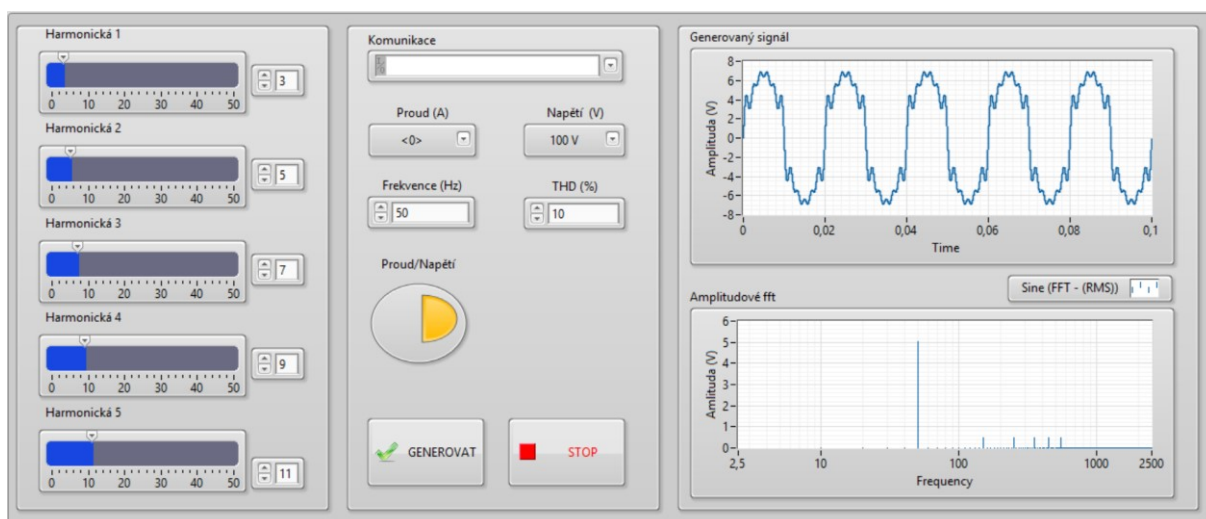
$$y = (1E - 6) * f + 0,0583 \quad (10)$$

Toto měření a následná korekce byly provedeny pro všechny rozsahy proudového signálu, což v tomto případě znamená 0,2-0,4-0,6-0,8 A, ale z důvodu rozsáhlosti tabulek a grafů jsou uvedeny zbylé výsledky v příloze I-IV.

10 Realizace virtuálního napěťového a proudového generátoru v LabVIEW

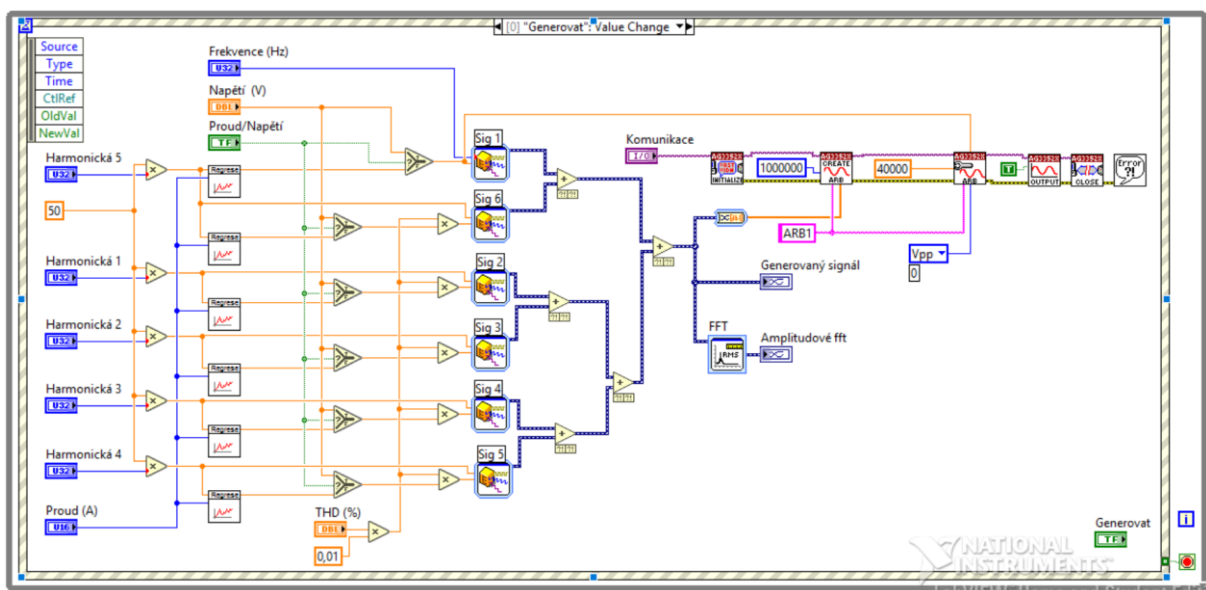
Cílem bylo vytvořit aplikaci pro možnost generování napěťového a proudového signálu s možností uživatelsky definovaného signálu, kde lze přidat k základní frekvenci 50 Hz signálu až pět harmonických, které mohou mít rozdílnou frekvenci. Dále lze nastavit velikost amplitudy jednotlivých harmonických v procentech. Uživatel má možnost sledovat signál ve dvou grafech. První z grafů zobrazuje generovaný signál, který je poslán do generátoru Agilent. Druhý graf zobrazuje amplitudové FFT spektrum generovaného signálu.

Na obrázku 30 je vyobrazen čelní panel virtuálního generátoru. Uživatel má možnost zvolit, zda chce generovat proudový nebo napěťový signál, dále jeho frekvenci, počet harmonických obsažených v signálu a hodnotu THD. V tomto nastavení, je možnost vidět generaci uživatelsky definovaného napěťového signálu, který se skládá z pěti lichých harmonických, které mají hodnotu 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz, 450 Hz a 550 Hz. Hodnota výstupního napětí na výkonovém zesilovači se bude rovnat hodnotě 100 V, která je zadána ve virtuálním generátoru. Amplituda harmonického zkreslení je v tomto případě nastavena na hodnotu 10 %.



Obrázek 30 Čelní panel virtuálního generátoru

Blokový diagram virtuálního generátoru na obrázku 31, zobrazuje způsob generace signálu. Celý blok diagram pro generaci signálu se nachází ve smyčce Event s názvem „Generovat“, která se provede stisknutím tlačítka s totožným názvem. Po stisknutí tlačítka se odešlou nastavená data do generátoru Agilent 33521B, který je dále posílá na vstup výkonového zesilovače AE TECHRON. Smyčka Event byla vybrána, protože nejlépe a nejefektivněji plní funkci. V tomto případě je nežádoucí, aby se na generátor Agilent posílal signál neustále nebo v určitých periodách, docházelo by totiž k neustálému přepisování a přepínání generátoru.



Obrázek 31 Blokový diagram virtuálního generátoru

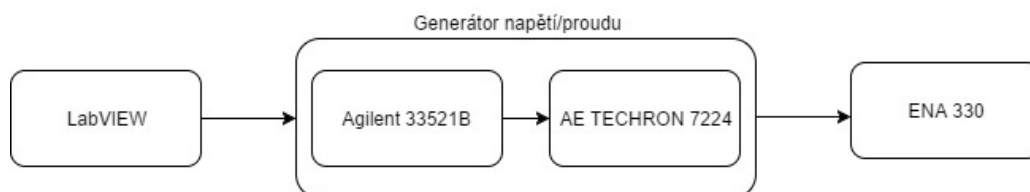
Jestliže se uživatel rozhodne zastavit virtuální generátor, tudíž přestat generovat uživatelský signál, stačí stisknout tlačítko Stop. Smyčka event zareaguje na tuto událost a provede kód, který lze vidět na obrázku 32. Dojde k vymazání volatilní paměti a všech průběhů na daném kanálu.



Obrázek 32 Vymazání volatilní paměti generátoru Agilent

11 Ověření funkčnosti na praktickém měření

K ověření funkčnosti vytvořeného generátoru je využit analyzátor kvality elektřiny ENA330 od firmy BK-ELCOM, kdy bylo zobrazeno FFT spektrum napětí nebo proudu v závislosti na měření. Na obrázku 33 lze vidět blokové schéma, pomocí kterého bylo provedeno kontrolní měření vytvořeného generátoru.



Obrázek 33 Blokové schéma znázorňující ověření generátoru

11.1 Ověření napětíového uživatelem definovaného signálu

Měření se provádělo na přístroji ENA 330, kde bylo nastaveno měření pro napětíový jednofázový signál, při rozsahu napětí 110 V. Ověření probíhalo generováním požadované hodnoty napětí základní harmonické, která měla hodnotu frekvence 50 Hz. K tomuto signálu byl přidán signál, který se skládal z pěti lichých harmonických a měl různé zastoupení amplitudového zkreslení v rozmezí 5-20 %. Takto se systematicky postupovalo až do 49 harmonické.

Z naměřených výsledků je patrné, že generátor je schopen generovat výstupní napětí i při zkreslení vyšších harmonických.

Tabulka 25 Ověření napěťového uživatelem definovaného signálu 60 V

U = 60 V		U _i = 5 %		U _i = 10 %		U _i = 20 %	
HARM.	f (Hz)	U _i (V)	U _i (%)	U _i (V)	U _i (%)	U _i (V)	U _i (%)
3	150	3,001	5	6,009	10,01	11,997	20
5	250	3,002	5	6,009	10	11,998	20
7	350	3,002	5	6,008	10	11,983	20
9	450	3,003	5	6,005	10	11,988	19,99
11	550	3,002	5	6,007	10	11,993	20
13	650	3,002	5	6,007	9,99	12,003	19,99
15	750	3,002	5	6,009	9,99	12,005	19,98
17	850	3,003	5	6,008	9,98	12,007	19,96
19	950	3,003	5	6,007	9,99	12,005	19,97
21	1050	3,003	5	6,009	10,01	12,016	20,01
23	1150	2,903	5	6,009	10,01	12,034	20
25	1250	3,004	5	6,008	10,01	12,036	20,02
27	1350	3,002	5,01	6,008	10,01	12,053	20,03
29	1450	3,001	5,01	6,011	10,02	12,005	20,01
31	1550	3,003	5,02	6,013	10,04	12,005	20,04
33	1650	3,002	5,01	6,007	10,01	12,031	20,01
35	1750	3,002	5,01	6,001	10	12,008	20
37	1850	3,002	5,01	6,004	10,02	12,031	20,05
39	1950	3,003	5,02	6,007	10,03	12,04	20,04
41	2050	3,001	5	6,003	10,01	12,028	20,01
43	2150	3,002	5,02	6,024	10,04	12,017	20,03
45	2250	3,004	5,03	6,03	10,05	12,006	20,01
47	2350	2,999	5,04	6,029	10,05	12,01	20,04
49	2450	2,998	5,05	6,02	10,03	12,003	12,02

Tabulka 26 Ověření napětového uživatelem definovaného signálu 80 V

U = 80 V		U _i = 5 %		U _i = 10 %		U _i = 20 %	
HARM.	f (Hz)	U _i (V)	U _i (%)	U _i (V)	U _i (%)	U _i (V)	U _i (%)
3	150	4,001	5	8,001	10	16,002	19,98
5	250	4,002	5	8,002	10	16,001	19,99
7	350	4,001	5	8,001	10	16,002	19,98
9	450	4,003	4,99	8,001	10	16,002	19,98
11	550	4,002	5	8,002	10	16,003	19,99
13	650	4,002	5	8,001	10,01	16,002	19,98
15	750	4,001	4,99	8,002	9,98	16,004	20
17	850	4,001	4,99	8,002	9,98	16,002	20,01
19	950	4,002	4,99	8,002	10	16,003	19,98
21	1050	4,001	5	8,003	9,99	16,002	19,99
23	1150	4	4,99	8,003	10,01	16,004	19,99
25	1250	3,99	5,01	8,004	10,02	16,003	20,03
27	1350	4,002	5,01	8,003	10,01	16,005	20,04
29	1450	4,001	5,01	8,004	10,02	16,01	20,04
31	1550	4,001	5	8,005	10,03	16,005	20,02
33	1650	4,002	5,01	8,001	10	16,004	20,02
35	1750	4,001	5	8,002	10,01	16,002	19,97
37	1850	3,999	5,02	8,003	10,03	16	20,04
39	1950	4,001	5,01	8,005	10,05	16,004	20,05
41	2050	4,002	5	8,001	10	16,002	20,01
43	2150	3,998	5,02	8,002	10,03	16,004	20,05
45	2250	3,997	5,03	8,004	10,05	16,001	20,01
47	2350	3,997	5,04	7,999	10,05	16,003	200,2
49	2450	3,996	5,04	7,998	10,06	16,01	20,05

Tabulka 27 Ověření napětového uživatelem definovaného signálu 100 V

U = 100 V		U _i = 5 %		U _i = 10 %		U _i = 20 %	
HARM.	f (Hz)	U _i (V)	U _i (%)	U _i (V)	U _i (%)	U _i (V)	U _i (%)
3	150	5,001	5,01	10,002	10	19,999	19,99
5	250	5,003	5	10,003	10	20	20,01
7	350	5,002	5	10,002	10	20	19,99
9	450	5	4,99	10,001	9,99	20,001	19,99
11	550	5,001	4,99	10	10	20	20
13	650	5	5	9,999	10	19,999	19,99
15	750	5	5	10	9,99	20,002	19,96
17	850	5	5	9,998	9,98	20,003	19,97
19	950	5,001	4,99	9,998	9,98	20,002	19,98
21	1050	5,002	4,99	10,001	10	20,002	19,97
23	1150	5	5	10	10	20	20,01
25	1250	5,002	5,01	10,002	10,01	20,002	20,03
27	1350	5,002	5,01	10,001	10,01	20,003	20,03
29	1450	5,001	5,01	10,002	10,02	20,005	20,04
31	1550	5,002	5,01	10	10,02	20,004	20,04
33	1650	5,001	5,01	10,003	10,03	20,003	20,02
35	1750	5	5	10,002	10,01	20	20
37	1850	5,003	5,02	10,003	10,02	20,001	20,01
39	1950	5	5	10,002	10,02	19,999	20,02
41	2050	5,01	5,01	10	10	19,998	20
43	2150	4,999	5,01	10,004	10,03	19,997	20,4
45	2250	4,999	5,03	9,999	10,05	19,995	20,06
47	2350	4,996	5,04	9,996	10,06	19,994	20,02
49	2450	4,991	5,05	9,995	10,05	19,993	20,02

11.2 Ověření proudového měřicího signálu

Pro ověření proudového měřicího signálu, byl použit opět přístroj ENA 330, kdy za pomoci nepřímého měření pomocí proudových kleští, byl měřen výstupní proud. Na přístroji ENA 330 bylo nastaveno měření pro jednofázové napětí na nejnižší hodnotu 60 V a současně jednofázový proud. Měření probíhalo opět generováním základní harmonické 50 Hz se 100 % hodnotou amplitudy a k tomuto signálu byly přidán signál, který obsahoval pět lichých harmonických s hodnotou amplitudy 10 % z celkové hodnoty.

Jelikož byl proud měřen pomocí proudových kleští, kdy měření probíhá nepřímě, nejsou naměřené hodnoty proudu tak přesné jako je tomu u napětí, kdy je měření přímo na výstupu.

Tabulka 28 Ověření proudové měřícího signálu od 0,2 A do 0,6 A

I _i = 10 %		I = 0,2 A		I = 0,4 A		I = 0,6 A	
HARM.	f (Hz)	I _i (mA)	I _i (%)	I _i (mA)	I _i (%)	I _i (mA)	I _i (%)
3	150	20,317	9,93	41,352	10,03	61,11	9,97
5	250	20,866	10	41,751	10,01	61,16	9,98
7	350	20,217	9,97	41,803	10,01	62	9,99
9	450	20,64	10,03	41,78	10	62,201	9,98
11	550	21	10	41,749	10,02	62,221	10
13	650	18,125	9,79	40	9,95	55,201	9,81
15	750	18,321	10	39	10	55	9,82
17	850	18,34	10	38,92	9,84	55,357	9,84
19	950	18,4	9,9	38,98	9,94	55,148	9,83
21	1050	18,338	9,99	38,9	9,89	55,185	9,89
23	1150	18,806	9,8	38	9,65	56,257	9,64
25	1250	18,606	9,7	38,2	9,82	56,163	9,72
27	1350	18,765	9,64	38,103	9,83	56,16	9,81
29	1450	18,601	9,83	37,9	9,82	56,32	9,68
31	1550	18,796	9,96	37,67	9,89	56,251	9,79
33	1650	18,351	9,89	37,9	9,9	54,973	9,56
35	1750	18,18	9,91	36,9	9,82	55,036	9,53
37	1850	18,307	9,8	36,742	9,7	54,939	9,61
39	1950	18,292	9,85	36,751	9,65	54,767	9,67
41	2050	18,157	9,53	36,669	9,6	55,045	9,62
43	2150	18,845	9,45	38,181	9,61	56,653	9,54
45	2250	18,829	9,46	38,087	9,62	57,157	9,52
47	2350	18,873	9,63	38,071	9,58	56,993	9,5
49	2450	19	9,54	38,081	9,6	56,765	9,55

Tabulka 29 Ověření proudového měřicího signálu pro 0,8 a 1 A

$I_i = 10 \%$		$I = 0,8 \text{ A}$		$I = 1 \text{ A}$	
HARM.	f (Hz)	I_i (mA)	I_i (%)	I_i (mA)	I_i (%)
3	150	82,793	9,76	103,028	9,93
5	250	83,259	9,83	103,014	9,9
7	350	83,389	9,87	103,062	9,89
9	450	83,056	9,96	103,257	9,92
11	550	82,999	9,84	103,592	9,91
13	650	73,767	9,83	92,832	9,81
15	750	74	9,91	92,261	9,86
17	850	74,574	9,89	92,143	9,87
19	950	74,02	9,87	92,095	9,85
21	1050	74,004	9,8	91,963	9,85
23	1150	75,528	9,8	93,987	9,8
25	1250	75,448	9,75	93,724	9,75
27	1350	75,389	9,78	93,76	9,75
29	1450	75,459	9,72	93,664	9,76
31	1550	75,292	9,75	93,63	9,66
33	1650	73,737	9,67	91,284	9,56
35	1750	73,578	9,66	91,946	9,57
37	1850	73,598	9,63	91,678	9,57
39	1950	73,635	9,53	91,5	9,58
41	2050	73,402	9,56	91,574	9,64
43	2150	76,543	9,48	95,209	9,43
45	2250	76,515	9,53	95,048	9,47
47	2350	76,277	9,54	94,752	9,52
49	2450	76,064	9,4	94,623	9,51



Obrázek 34 Ukázka měřicího pracoviště pro ověření generátoru

12 Závěr

Všechny cíle této bakalářské práce byly splněny. V průběhu řešení byla vytvořena aplikace v programu LabVIEW pro generaci uživatelem definovaného signálu, kdy je možno k základnímu signálu přidat signál, který bude obsahovat až pět harmonických o různé frekvenci a hodnotě amplitudy. Tato aplikace virtuálního generátoru komunikuje přes rozhraní USB 2.0 s generátorem Agilent 33521B za pomoci přístrojového driveru.

Při realizaci proudového, uživatelem definovaného, měřicího signálu bylo postupováno od nízké úrovně proudu. V tomto případě se jednalo nejprve o hladinu proudu do 20 mA, kdy byla ověřena možnost generace proudového signálu v závislosti na vstupním napětí, které je přivedeno na operační zesilovač TL071 v invertujícím i neinvertujícím zapojení. Poté se přistoupilo k vyšší hladině proudu, která odpovídala hodnotě 200 mA, kdy byla proměřena kmitočtová charakteristika a zesílení operačního zesilovače TDA2020.

Aby bylo dosaženo potřebné hladiny proudového a napěťového signálu byl použit výkonový zesilovač AE TECHRON 7224, u kterého byla proměřena frekvenční charakteristika v rozsahu 50 Hz až 2500 Hz a ověřena jeho frekvenční nezávislost, kdy byl schopen konstantně zesilovat vstupní signál.

Ověření na praktickém měření bylo provedeno pomocí analyzátoru kvality elektřiny ENA 330, kdy byl nejdříve proměřen napěťový uživatelsky definovaný signál do hodnoty 100 V AC, který byl zkreslen až pěti lichými harmonickými do 49, která odpovídá frekvenci 2450 Hz. Tyto harmonické měly hodnotu amplitudy v rozsahu 5-20 % vzhledem k první harmonické. Z naměřených výsledků je patrné, že funkčnost generátoru odpovídá předpokladům a drobné odchylky jsou způsobeny přesností analyzátoru, který má třídu přesnosti 0,1 %.

Proudový, uživatelem definovaný, měřicí signál byl taktéž ověřen na analyzátoru ENA 330, kdy generovaný proudový signál v rozmezí 0,2 A až 1 A byl namixován signálem, který obsahoval pět lichých harmonických s amplitudovým zkreslením 10 % vzhledem k základní harmonické signálu. Toto měření bylo prováděno v celém frekvenčním spektru až do 49 harmonické. Z důvodu použití nepřímé metody měření pomocí proudových kleští, které samy o sobě mají určitou nepřesnost a samotná přesnost analyzátoru je 0,1 %, tyto aspekty způsobily drobné odchylky v řádech desetin procent.

Seznam literatury

- [1] Oscilátory. *Dmaster* [online]. [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: <http://www.dmaster.wz.cz/teorie/oscilatory/oscilatory.htm>
- [2] HÁJOVSKÝ, Radovan. Elektronická měření a přístroje: METODOLOGIE MĚŘENÍ SE SPEKTRÁLNÍM ANALYZÁTOREM A SIGNÁLNÍM GENERÁTOREM [online]. Ostrava: VŠB-TUO, 4-11 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://lms.vsb.cz/mod/resource/view.php?id=174888>
- [3] *Agilent 33521B* [online]. [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: http://about.keysight.com/en/newsroom/imagelibrary/library/33500_images/image004_high.jpg
- [4] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. *Keysight Technologies 33500B Series Waveform Generators*. Data sheet. Keysight Technologies, USA, c2012-2015. Dostupné z: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-0692EN.pdf>
- [5] Complex Modulation Generation with Low-Cost Arbitrary Waveform Generators: Keysight's Trueform Architecture for Wireless Applications [online]. USA, 2014, 10 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-1100EN.pdf?id=2232117>
- [6] Keysight Technologies: 34401A Digital Multimeter [online]. USA, 2016 [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5968-0162EN.pdf?id=1000070110:epsg:dow>
- [7] 7224 DC-ENABLED AC POWER AMPLIFIER. AE TECHRON [online]. [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: <http://www.aetechron.com/IND-RESEARCH-7224.shtml>
- [8] 7224 Operator's Manual: Single-Channel Industrial Amplifier for Demanding, High-Power Systems. AE TECHRON [online]. Elkhart, 2016 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: http://www.aetechron.com/pdf/7224_OperatorManual.pdf
- [9] 7224 SPECIFICATION SHEET. AE TECHRON [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.aetechron.com/pdf/7224specsheel.pdf>
- [10] AE-Techron-7224_R. In: ATECorp [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: https://www.atecorp.com/ATECorp/media/ProductImages/R/AE-Techron-7224_R.png
- [11] HERENCŠÁR, Norbert a Kamil VRBA. Přeladitelné filtry s OTA zesilovači. *Elektrorevue* [online]. 2007, 2007(28), 1-2 [cit. 2017-04-24]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://elektrorevue.cz/cz/clanky/analogova-technika--vzajemny-a-d-prevod/0/preladitelne-filtry-s-ota-zesilovaci/>
- [12] ENA330. ELCOM [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.elcom.cz/cz/produkty/merici-systemy/merici-systemy-pro-energetiku/pristroje/ena330>

[13] ENA 330: Přenosný analyzátor kvality elektřiny. ELCOM [online]. aktualizováno 16.1.2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné

z:

http://www.elcom.cz/images/ELCOM/Products_and_Services/Test_And_Measurement/Electrical_Network_Analyzers/Power_Quality_Analyzers/ENA330/ena330_cz.pdf

[14] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK, Martin VLACH a Viktorie VLACHOVÁ. *Začínáme s LabVIEW*. 1. Praha: BEN- technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.

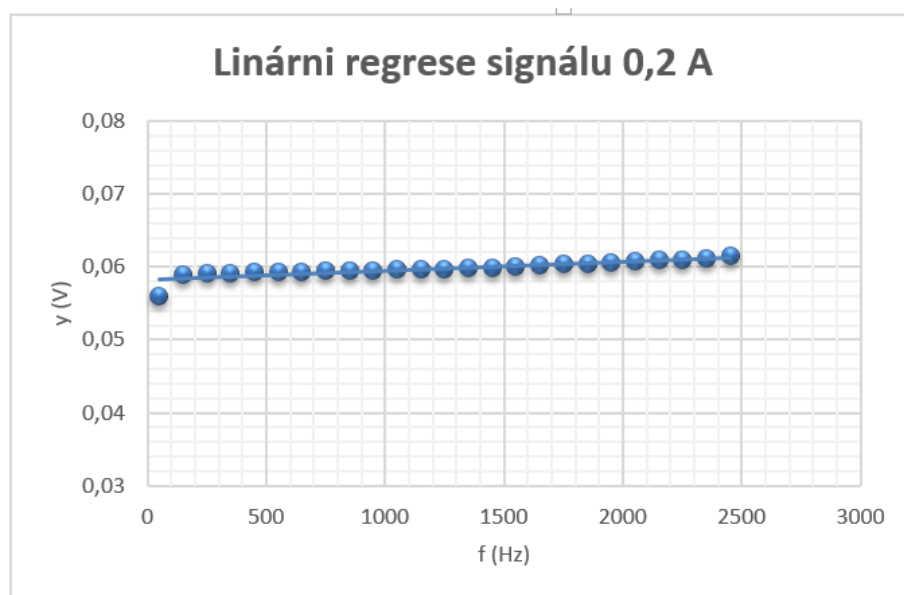
[15] WITTASSEK, Tomáš. *Virtuální instrumentace I*. Sylaby do předmětu Virtuální instrumentace I. Ostrava 2012. 264 s.

Seznam příloh

I.	Proměření a korekce proudového signálu 0,2 A.....	I
II.	Proměření a korekce proudového signálu 0,4 A.....	II
III.	Proměření a korekce proudového signálu 0,6 A.....	III
IV.	Proměření a korekce proudového signálu 0,8 A.....	IV
V.	Přílohy na CD.....	V

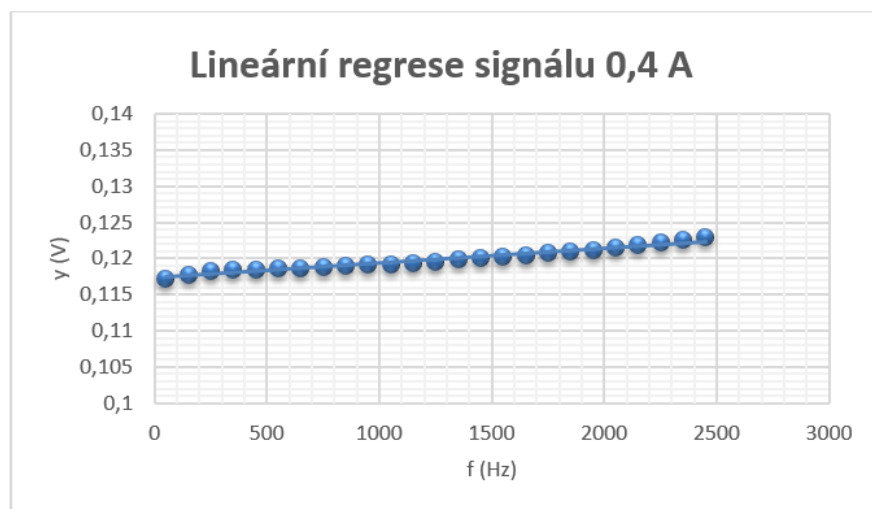
I. Proměření a korekce proudového signálu 0,2 A

Harm.	f (Hz)	I_{OUT} (A)	U_G (V _{PP})	y (V)
1	50	0,056	0,20031	0,05835
3	150	0,0589	0,20028	0,05845
5	250	0,0592	0,20038	0,05855
7	350	0,0592	0,20023	0,05865
9	450	0,05926	0,20004	0,05875
11	550	0,05935	0,20054	0,05885
13	650	0,05936	0,20021	0,05895
15	750	0,05945	0,20035	0,05905
17	850	0,05955	0,2006	0,05915
19	950	0,05955	0,20044	0,05925
21	1050	0,05965	0,20023	0,05935
23	1150	0,05975	0,20041	0,05945
25	1250	0,05975	0,20013	0,05955
27	1350	0,05995	0,20065	0,05965
29	1450	0,05995	0,20008	0,05975
31	1550	0,06005	0,20015	0,05985
33	1650	0,06015	0,20004	0,05995
35	1750	0,06035	0,20017	0,06005
37	1850	0,06045	0,20011	0,06015
39	1950	0,06057	0,20004	0,06025
41	2050	0,06075	0,20021	0,06035
43	2150	0,06095	0,20027	0,06045
45	2250	0,06105	0,20005	0,06055
47	2350	0,06125	0,20013	0,06065
49	2450	0,06145	0,20019	0,06075



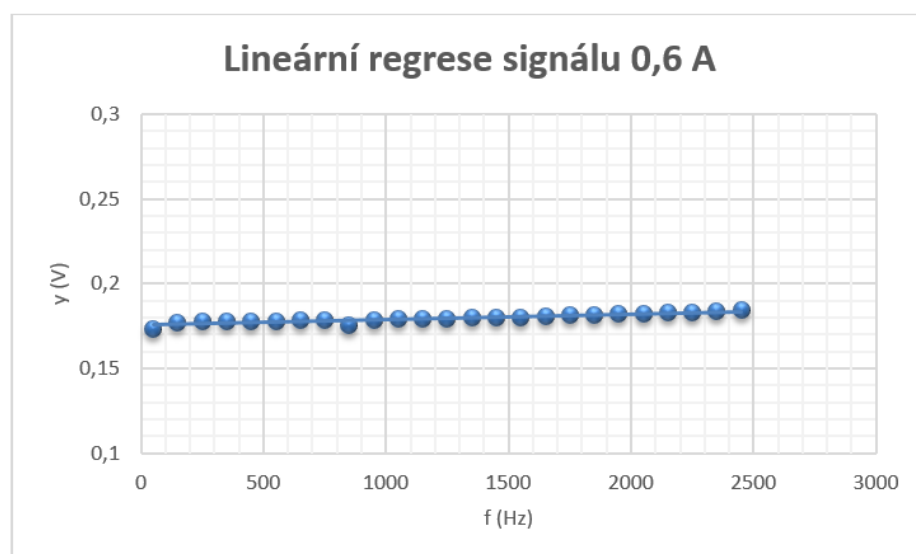
II. Proměření a korekce proudového signálu 0,4 A

Harm.	f (Hz)	I _{OUT} (A)	U _G (V _{PP})	y (V)
1	50	0,1172	0,40022	0,1174
3	150	0,1178	0,40012	0,1176
5	250	0,1182	0,40021	0,1178
7	350	0,1184	0,40061	0,118
9	450	0,1185	0,40041	0,1182
11	550	0,1186	0,4002	0,1184
13	650	0,1187	0,40031	0,1186
15	750	0,1188	0,40049	0,1188
17	850	0,1189	0,40023	0,119
19	950	0,1191	0,40026	0,1192
21	1050	0,1192	0,40017	0,1194
23	1150	0,1194	0,40023	0,1196
25	1250	0,1196	0,40033	0,1198
27	1350	0,1198	0,40043	0,12
29	1450	0,12	0,40022	0,1202
31	1550	0,1202	0,40016	0,1204
33	1650	0,1204	0,40012	0,1206
35	1750	0,1207	0,40026	0,1208
37	1850	0,1209	0,40009	0,121
39	1950	0,1212	0,40019	0,1212
41	2050	0,1215	0,40021	0,1214
43	2150	0,1218	0,40012	0,1216
45	2250	0,1222	0,40038	0,1218
47	2350	0,1225	0,40021	0,122
49	2450	0,1229	0,40036	0,1222



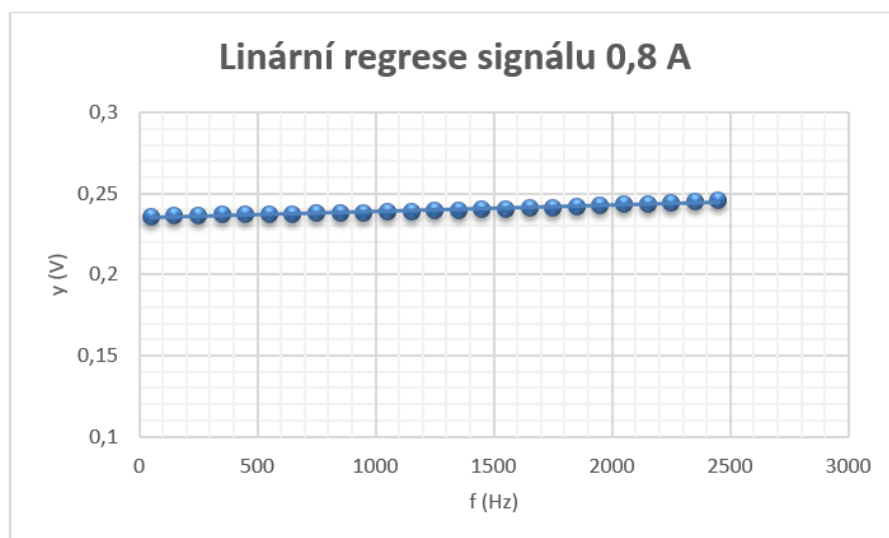
III. Proměření a korekce proudového signálu 0,6 A

Harm.	f (Hz)	I _{OUT} (A)	U _G (V _{PP})	y (V)
1	50	0,1729	0,60012	0,17555
3	150	0,1771	0,60009	0,17585
5	250	0,1774	0,60048	0,17615
7	350	0,1777	0,60058	0,17645
9	450	0,1779	0,60014	0,17675
11	550	0,1781	0,6008	0,17705
13	650	0,1782	0,60044	0,17735
15	750	0,1784	0,60023	0,17765
17	850	0,1755	0,60001	0,17795
19	950	0,1787	0,60014	0,17825
21	1050	0,179	0,60042	0,17855
23	1150	0,1792	0,60041	0,17885
25	1250	0,1795	0,60045	0,17915
27	1350	0,1798	0,60038	0,17945
29	1450	0,1801	0,60031	0,17975
31	1550	0,1803	0,60009	0,18005
33	1650	0,1807	0,60011	0,18035
35	1750	0,1812	0,60012	0,18065
37	1850	0,1816	0,60037	0,18095
39	1950	0,1819	0,60004	0,18125
41	2050	0,1824	0,60036	0,18155
43	2150	0,1828	0,60012	0,18185
45	2250	0,1833	0,60023	0,18215
47	2350	0,1838	0,60018	0,18245
49	2450	0,1843	0,60011	0,18275



IV. Proměření a korekce proudového signálu 0,8 A

Harm.	f (Hz)	I _{OUT} (A)	U _G (V _{PP})	y (V)
1	50	0,236	0,8002	0,2353
3	150	0,2361	0,8008	0,2357
5	250	0,2364	0,80039	0,2361
7	350	0,2369	0,80065	0,2365
9	450	0,2371	0,80032	0,2369
11	550	0,2373	0,80019	0,2373
13	650	0,2375	0,80029	0,2377
15	750	0,2378	0,80024	0,2381
17	850	0,2381	0,80048	0,2385
19	950	0,2383	0,80033	0,2389
21	1050	0,2386	0,80026	0,2393
23	1150	0,239	0,80046	0,2397
25	1250	0,2393	0,80028	0,2401
27	1350	0,2397	0,80034	0,2405
29	1450	0,2401	0,80034	0,2409
31	1550	0,2405	0,8002	0,2413
33	1650	0,241	0,80042	0,2417
35	1750	0,2414	0,80019	0,2421
37	1850	0,242	0,80043	0,2425
39	1950	0,2425	0,80035	0,2429
41	2050	0,2431	0,80048	0,2433
43	2150	0,2436	0,80013	0,2437
45	2250	0,2443	0,80029	0,2441
47	2350	0,2449	0,80012	0,2445
49	2450	0,2456	0,80011	0,2449



V. Přílohy na CD

- Bakalářská práce
- Agilent 3352X Series
- BP_Základní_Generátor_HAL0129
- BP_Virtuální_Generátor_HAL0129
- Regrese (SubVI)